MCIT
Modeling, control & information technologies

VIII International Scientific-Practical Conference
November 6-8, Rivne, Ukraine

2025

Modeling, control and information technologies

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та природокористування
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Національний університет «Львівська політехніка»
Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича
Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України
Наукове товариство імені Шевченка
Люблінська Політехніка (Польща)
Вроцлавська Політехніка (Польща)
Університет Ньюкасла (Велика Британія)
Чеський технічний університет в Празі (Чеська Республіка)



«Моделювання, керування та інформаційні технології»

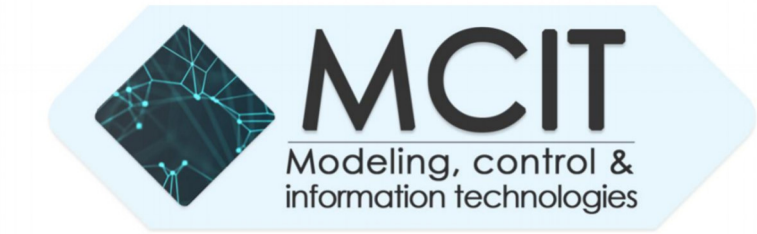
VIII МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

6–8 листопада 2025
Рівне, Україна

Матеріали конференції

Рівне
2025

Ministry of Education and Science of Ukraine
National University of Water and Environmental Engineering
Taras Shevchenko National University of Kyiv
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
Lviv Polytechnic National University
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of NAS of Ukraine
Shevchenko Scientific Society
Lublin University of Technology (Poland)
Wroclaw University of Science and Technology (Poland)
Newcastle University (Great Britain)
Czech Technical University in Prague (Czech Republic)



«Modeling, control and information technologies»

VIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

6–8 November 2025
Rivne, Ukraine

Conference materials

Rivne
2025

ISBN 978-966-327-666-3
ISSN 2707-1049 (Online)
ISSN 2707-1030 (Print)

МІЖНАРОДНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Мошинський Віктор (Україна)
Кушнір Роман (Україна)
Шаховська Наталія (Україна)
Агратіні Октавіан (Румунія)
Бомба Андрій (Україна)
Бурдук Анна (Польща)
Бігун Ярослав (Україна)
Білкова Ева (Чеська Республіка)
Бедункова Ольга (Україна)
Василець Святослав (Україна)
Волощук Володимир (Україна)
Воробель Роман (Україна)
Вуйцік Вальдемар (Польща)
Гамзе Гюрзой (США)
Герасімов Євгеній (Україна)
Гордійчук Павло (США)
Грицюк Петро (Україна)
Древецький Володимир (Україна)
Качмарек Маріуш (Польща)
Комада Павел (Польща)
Крстіч Драгана (Serbia)
Кубік Юзеф (Польща)
Литвиненко Володимир (Україна)
Ляшко Сергій (Україна)
Мартинюк Петро (Україна)
Мазурек Павел (Польща)
Нагарая Шішір (Велика Британія)
Наконечний Олександр (Україна)
Новак Петр (Чеська Республіка)
Пасічник Володимир (Україна)
Паталяс-Малішевська Юстина (Польща)
Прищепа Алла (Україна)
Річ Лі (Тайвань)
Роєк Ізабела (Польща)
Рябенко Олександр (Україна)
Сабзієв Ельхан (Азербайджан)
Савіна Наталія (Україна)
Сафоник Андрій (Україна)
Сидор Андрій (Україна)
Тадеєв Петро (Україна)
Трофимчук Олександр (Україна)
Турбал Юрій (Україна)
Цєшко Мечислав (Польща)
Чачанідзе Гурам (Грузія)
Черній Дмитро (Україна)
Христюк Андрій (Україна)

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Сафоник Андрій, Мартинюк Петро, Басюк Тетяна, Галич Оксана, Корбутяк Василь, Присяжнюк Олена, Прищепа Оксана, Сунічук Сергій, Христюк Андрій

Відповідальний за випуск: **Сафоник Андрій**
Підготовлено до друку: **Басюк Тетяна**

Матеріали конференції розглянуті і рекомендовані до видання на Вченій раді Національного університету водного господарства та природокористування 31 жовтня 2025 р., протокол № 11

Моделювання, керування та інформаційні технології : матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції. [Електронне видання]. – Рівне : Національний університет водного господарства та природокористування, 2025. – 438 р.

© Національний університет водного господарства та природокористування, 2025

ISBN 978-966-327-666-3
ISSN 2707-1049 (Online)
ISSN 2707-1030 (Print)

INTERNATIONAL PROGRAM COMMITTEE

Moshynskyi Viktor (Ukraine)
Kushnir Roman (Ukraine)
Shakhovska Natalia (Ukraine)
Agratini Octavian (Romania)
Bomba Andrii (Ukraine)
Burduk Anna (Poland)
Bigun Yaroslav (Ukraine)
Bílková Eva (Czech Republic)
Bedunkova Olha (Ukraine)
Vasylets Sviatoslav (Ukraine)
Voloshchuk Volodymyr (Ukraine)
Vorobel Roman (Ukraine)
Wójcik Waldemar (Poland)
Gamze Gursoy (USA)
Gerasimov Ievgenii (Ukraine)
Gordiichuk Pavlo (USA)
Hrytsiuk Petro (Ukraine)
Drevetskyi Volodymyr (Ukraine)
Kaczmarek Mariusz (Poland)
Komada Paweł (Poland)
Krstić Dragana (Serbia)
Kubik Józef (Poland)
Lytvynenko Volodymyr (Ukraine)
Lyashko Serhii (Ukraine)
Martyniuk Petro (Ukraine)
Mazurek Paweł (Poland**)**
Nagaraja Shishir (Great Britain)
Nakonechnyi Oleksandr (Ukraine)
Nowak Petr (Czech Republic)
Pasichnyk Volodymyr (Ukraine)
Patalas-Maliszewska Justyna (Poland)
Pryshchepa Alla (Ukraine)
Rich C. Lee (Taiwan)
Rojek Izabela (Poland)
Riabenko Oleksand (Ukraine)
Sabziev Elkhan (Azerbaijan)
Savina Nataliia (Ukraine)
Safonyk Andrii (Ukraine)
Sydor Andrii (Ukraine)
Tadeiev Petro (Ukraine)
Trofimchuk Oleksandr (Ukraine)
Turbal Yurii (Ukraine)
Cieszko Mieczysław (Poland)
Chachanidze Guram (Georgia)
Chernii Dmytro (Ukraine)
Khrystiuk Andrii (Ukraine)

ORGANIZING COMMITTEE OF CONFERENCE

Safonyk Andrii, Martyniuk Petro, Basiuk Tetiana, Halych Oksana, Korbutiak Vasyl, Prysiazhniuk Olena, Pryshchepa Oksana, Sunichuk Sergii, Khrystiuk Andrii

Responsible for release: **Andrii Safonyk**
Prepeared for publication: **Basiuk Tetiana**

Conference materials have been reviewed and accepted for publication by the Academic Council of the National University of Water and Environmental Engineering on October 31, 2025, Academic Council Meeting Minutes # 11.

Modeling, control and information technologies : Materials of VIII International scientific and practical conference. [Electronic edition]. – Rivne : National University of Water and Environmental Engineering, 2025. – 438 p.

© National University of Water and Environmental Engineering, 2025

СЕКЦІЯ 1. ГІДРОІНФОРМАТИКА, ГІДРОТЕХНІКА ТА УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ	
Chiragov F. The Weaponization of Water: Environmental Policy as a Tool of Russian Hybrid Warfare in the Caspian Sea	13
Klimov S., Martynov S., Kunitskyi S., Kupchyk L. Risk and Hazard Analysis of Riverbank Filtration Water Intakes for Water Safety Planning	17
Kozishkurt S., Turchenyuk V., Zhylchuk Y. Optimization of Sprinkling Parameters for Improved Irrigation Quality	22
Prykhodko N, Rokochinskiy A., Volk P. Necessity and ways to improve the systems of irrigation management on a resource basis	25
Turchenyuk V., Kozishkurt S., Voitsekhovych N. Modeling and Management of Rice Water Consumption in the Danube Delta	28
Басюк Т., Онуфрійчук В., Сисонюк І. Екологічна оцінка впливу антропогенних екополютантів на гідробіонтів річки Сула	31
Богаєнко В., Ромащенко М., Коломієць С., Сардак А. Математична оцінка оптимальних конструктивних параметрів дренажних систем подвійної дії для різних ґрунтових умов України	34
Богуш О. Конструкція й принцип роботи гідромеханічних датчиків рівня води в системі гідрорегулятора АРУ-200Ц	38
Волк Л., Довбенко І. Удосконалення методів визначення коефіцієнта гідравлічного опору з урахуванням просторових характеристик шорсткості трубопроводів	40
Жильчук В., Жуковська Н. Порівняльний аналіз програмного забезпечення для моделювання деформацій ґрунту	42
Мельничук В., Бровко Г., Басюк Т., Столярець М., Дасов Ю. Оцінка придатності артезіанських свердловин Рівненщини для рибогосподарського використання	44
Мельничук І. Правові та регуляторні бар'єри інвестування у модернізацію іригаційної інфраструктури України	47
Мельничук І., Корнійчук В. Басейнові рибоходи як ключові елементи екологічного покращення водотоків	49
Омельчак Ю., Попадюк І.. Принципи фізичного моделювання циркуляційних систем технічного водопостачання	53
Ромащенко Є., Онопко О., Волк П., Рокочинський А. Удосконалення розрахунку параметрів дренажу з урахуванням глибокого розпушення ґрунту	58
Токар Л., Панасюк І. Техніко-економічне обгрунтування допустимих рівнів надійності для гідромеліоративних споруд	61
СЕКЦІЯ 2. ЕНЕРГЕТИКА ТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ	
Bílková E., Nowak P. Numerical Modelling and Transient Analysis of a Small Hydropower Plant	65

Dubovyk V., Mitiuk L., Shtanheieva K., Osadchik K., Shecvhuk B. Design Features of Nonisolated DC/DC Converters for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems	68
Masniak O., Vyshnevska S.-A. Development of Software for the Design of Differential Pressure Flowmeters in Accordance with the Updated ISO 5167:2022	72
Василець С., Василець К., Ільчук В. Оцінювання значень параметрів моделі конденсаторного збуджувача асинхронного генератора	75
Василець С., Глущук В. Оцінювання фазових векторів напруг та струмів електромережі за дискретними відліками миттєвих значень	77
Галич О., Бєдний М. Експериментальне та комп'ютерне моделювання роботи трикутного водозливу	79
Галич О., Данильчук Р. Тарування трапецієвидного водоміру за допомогою HEC-RAS	82
Герба О. Удосконалення лабораторної установки для досліджень гвинтових турбін шнекового типу в малій гідроенергетиці	85
Гнатюк Д. Проєктування поліпшеної архітектури LSTM та XGBoost для контекстно-орієнтованого виявлення аномалій у журналах подій на основі CPU	89
Костюк О., Стецюк І. Утилізація теплоти відхідних димових газів у проточному барботажному шарі контактного утилізатора теплоти	92
Сунічук С. Дослідження технічного стану причальної стінки та берегоукріплення	95
Філіпович Ю., Боднарчук А., Каграманян К. Моніторинг вібраційного стану агрегатів гідроелектростанцій	97
Чернобиль О., Попруга П., Поплавський Д. Чисельне моделювання гідравлічних параметрів нижнього б'єфу гідроелектростанції	100
СЕКЦІЯ 3. ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ	
Hladka O., Karpovich I., Tymrakevych A. Software module for capturing and tracking moving targets	105
Huseynov A., Abdullayeva A. Mathematical Approximation and Physical-Technical Aspects of the Operation of an Atmospheric Acousto-Optic Locator with an Electronic Scanner in Military Specialized Systems	107
Kruk R., Zhukovska N. Prompt-Based Automation of Agile Requirements Documentation: Design for Limited-Infrastructure Environment	114
Samadova K. Digitalized urban transport system in small cities	118
Білущак Ю., Чернуха О., Білущак Г.Статистичне моделювання та встановлення двосторнніх критичних областей для розв'язків параболічних задач за експериментальних даних на границі тіла	120
Весельський О. Об'єктно-орієнтовані мережі Петрі та можливості їх аналізу формальними методами	124
Геряк Ю., Берко А. Оцінка семантичної та часової узгодженості розподілених інформаційних ресурсів	126
Дацишин С., Мічута О. Хмарні технології та мобільні додатки в інтелектуальному управлінні рибними господарствами	130

Дрозд В., Мічута О. Захист даних в автоматизованих системах управління земельними ресурсами органів місцевого самоврядування	132
Красько Б., Грицюк П. Інтеграція PySpark Streaming з AWS EMR та Step Functions для обробки великих даних в реальному часі	134
Сафоник А., Полюхович О., Ковальчук Ю. Інформаційна система ідентифікації домішкових компонентів важких металів у рідких середовищах	136
Чабан В., Матіко Ф. Аналіз регіональних особливостей сезонного споживання природного газу у західному та центральному регіонах України	139
Шпортько О., Бомба А. Прискорення виконання алгоритму зменшення розміру сформованих DEFLATE-блоків за допомогою мемоізації в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат	141
СЕКЦІЯ 4. ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IoT) ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ	
Azimov R. A Comprehensive Methodology for Authorship Attribution of Literary Textual Works	146
Kovtunets V., Kovtunets O. System Of ARTIFICIAL Intellect as a Model Natural Intellect	149
Pashayev A., Sabziev E., Goyushova U. Curve Detection from Images in Video-Based Navigation Methods	152
Pavliuk V., Drevetskyi V. Intelligent Modeling of Educational Curricula Based on Labor Market Vacancy Analysis Using Semantic and Generative AI	155
Samoidiuk A., Ostapchuk O. The Intelligence of Things: How AI Transforms the IoT Ecosystem	159
Жуковський В., Повшенюк А., Зубик Я. Архітектура інтелектуального IoT-пристрою відображення черги виклику клієнтів	161
Кардаш О., Гладун Л. Освітня траєкторія ЄС у впровадженні штучного інтелекту	164
Климюк Ю. Розробка застосунку для генерування зображень додатків до свідоцтв про здобуття повної загальної середньої освіти та обчислення їх середнього балу	166
Остаповець П., Демчук О. Адаптивні нейромережеві моделі оцінювання та регулювання когнітивного навантаження у навчальних іграх	168
Петрова М., Попова М. Програмний інтелектуальний засіб стискання даних у міжмашинній комунікації	170
Подвишенний В., Сафоник А. Прогнозування траєкторій рухомих об'єктів як елемент інтелектуального відеоспостереження з БПЛА	172
Шендеровський В., Рувінська В. Сервіс на базі штучного інтелекту для допомоги у форматуванні академічних робіт	174
СЕКЦІЯ 5. КІБЕРНЕТИЧНА ТА ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКА	
Akhundov R., Ibrahimov B. Ensuring Information Security within the Military Environmental Safety System	179
Koverdiuk V., Ostapchuk O. Improving Performance and Reliability of Electronic Document Issuance Systems Using Caching and Asynchronous Processing	184
Бабич С., Слив'як Б., Онищук Г. Освітній потенціал CTF-змагань у структурі кіберполігонів для ЗВО	186

Герус В. Ілюзія безпечності: сучасні виклики та нові підходи в корпоративній кібербезпеці	189
Жуковський В., Панчук О. Архітектура кросплатформної системи персоналізованих міських турів з голосовою навігацією	191
Мороз Д. Марковські та байєсівські моделі у вебаналітиці поведінки користувачів	194
СЕКЦІЯ 6. МАТЕМАТИЧНЕ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ	
Anikushyn A., Nazarchuk V. Numerical Optimization of a Pseudoparabolic Systems with Memory	198
Belozerova O., Martyniuk P. Integral conjugation condition for smart geobarriers with assimilation of sensor data	202
Cherhykalo D. Exact signal reconstruction from highly incomplete nonlinear system	205
Gasanov A. Theoretical Research Of Reinforced Concrete Materials And Their Application In The Preparation Of Long-Term Support Zones	208
Gasanov A., Guliyev A., Hasanli R. Problems Of Effective Applications Of Air Defense Means Against Air Target Activating At Low Altitudes	211
Hasanov A., Saidivaliev S., Sabziev E, Khadzhimukhametova M., Pashayev A., Mamedova E. Mathematical Modeling of Coupled Wagon Movement on a Railway Hump	218
Ilnytskyi I. Comparative Analysis of Localization Methods for Accurate and Robust Positioning	221
Kochkarov V., Martyniuk P. Comparative Analysis of Pressure Reconstruction Methods from Simulation Impulse Data	224
Kolesnykov V., Klyushin D. Mass Transfer Problem with Saturation Limit on Graph	226
Komleva T. On the Solution of a Linear Fuzzy Cauchy Problem with Constant Coefficients	228
Krasilenko V., Nikitovich D., Lazarev A. The image processor based on signal ranking, determination of rank differences with their subsequent selection and weighted addition	230
Pashayev A., Sabziev E., Malikov S. On The Improving Algorithm for Stitching Images	235
Mamedov I., Huseynov A., Abdullayeva A. Combined Boundary Problem of 2D in the Geometrical Middle -1D in the Middle-1D Multi-Point type in the Non-Classical Treatment for 4D Bianchi Equation with Non-Smooth Coefficients, Arising in the Modeling of Vibration Processes and Integral Representation	238
Nykonchuk V. Forecasting Transport Service Demand under Dynamic Conditions: A Scenario-Based Approach	246
Onatskyi R., Misiura S. Improving Predictive Accuracy in Surrogate Modeling of Plate Deflection through Physics-Informed Feature Engineering	249
Pelypets R., Javorskyj I., Yuzefovych R., Lychak O. Monitoring of rolling bearing with inner race fault using parameters of vibration birhythmic stochastic recurrence	252

Plotnikov A. On the Solution of the Linear Set-valued Homogeneous Cauchy Problem with the Hukuhara Derivative	255
Pryshchepa O., Komada P. Control Strategies for Retrial Queues with a Single Retrial Attempt	257
Sandrakov G. Modeling of Two-phase Filtration Processes and Homogenization	259
Savych D., Pryshchepa O, Naumchuk O. Application of Machine Learning for Ethical Decision-Making	261
Semenov V., Chernorai V, Denysov S. Self-adaptive proximal algorithms for equilibrium problems in Hadamard space	263
Smetankina N., Misiura I., Misiura S. Analysis of vibrations of the working body of the vibrating separator in the resonant mode	266
Topylko P., Dankanych A. Mathematical Modeling of Rooftop Solar Energy Potential Using Geospatial and AI-Based Approaches	268
Tys M., Markovych B., Vyshnevskyi O., Korendiy V. Predictive Simulation of the Human Sit-to-Stand Transition	271
Биков В., Жуковська Н. Аналіз та використання фізичних моделей для симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях	275
Бігун Я., Українець О. Математичне моделювання впливу забруднення довкілля на епідемічний процес	277
Бомба А., Кушнір О. Моделювання гідродинамічних процесів у водоймах з ділянками поповнення течії	279
Бомба А., Лістьєв З., Мороз І. Елементи кібератематичного моделювання в напівпровідниковій електроніці	281
Гаврилюк М., Грицюк П. Використання закону розподілу трендових залишків врожайності для моделювання ризиків виробництва зерна	285
Гера Б., Чучвара А., Чернуха О., Білущак Ю. Визначення за дискретними даними функції концентрації домішкових частинок у граничній умові задачі масоперенесення	288
Жихарєв В., Місюра С., Шаповалова М., Водка О. Дослідження впливу нерівномірного розподілу волокон на механічні властивості композитів на основі воксельних моделей	292
Каштан С., Бомба А. Математичне моделювання та прогнозування керованих рухів поверхневих та підземних вод	294
Клепач М., Клепач М., Федоров Я. Параметрична оптимізація регуляторів векторного управління інвертором	298
Кушнір В., Кушнір О. Час безвідмовної роботи високонадійної напівмарківської системи двох ліфтів	301
Лістьєв З. Застосування спеціальних нейронних мереж у кібератематичному моделюванні	303
Маркович Б., Гайвась Б., Дмитрук А., Дмитрук В. Оцінка ресурсу трубопроводів зі зварними з'єднаннями у водневому середовищі	307
Мічута О., Мартинюк П. Про вплив сорбції хімічних речовин на процес нелінійної фільтраційної консолідації пористого середовища з геобар'єром	311
Приймак М. Дискретні періодичні шуми та їх використання при побудові періодичних послідовностей	314

Приймак М. Періодичні білі шуми з неперервним аргументом та їх використання при обгрунтуванні моделей стохастичної періодичних сигналів	316
Приходько Н., Трубаєв О. Прогнозування часу до відмови трубопроводів з урахуванням корозії, дефектів і тиску	318
Прокіп В. Про розв'язки матричного многочленного рівняння A(λ)X A(λ)+Y A(λ)B A(λ)=C A(λ) над полем	321
Турбал Ю., Турбал М., Кубай О., Смірнов Д., Мельничук М. Метод прогнозування на основі усереднення поліноміальної екстраполяційної послідовності	325
Уляньчук-Мартинюк О. Про вплив інтегральних умов спряження на просідання поверхні пористого середовища в умовах його неізотермічної консолідації: математична модель та схема її числового розв'язання	329
Хміль Р., Сбродов Є., Юзефович Р., Личак О., Яворський І. Індикатори першого порядку для визначення потужності гармонік детермінованих складових вібраційних сигналів	333
Ходневич Я., Трофимчук О., Корбутяк В. До питання агрегування прогнозів ансамблю нейронних мереж для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору	336
Чергикало Д. StEPConFi: доступний метод отримання плюрипотентності	339
Чернуха Ю. Моделювання дифузійних процесів у багатофазному випадково неоднорідному тілі з використанням діаграм Фейнмана	342
СЕКЦІЯ 7. РОБОТОТЕХНІКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КЕРУВАННЯ	
Akhundov R., Hashimov E. Enhancing the Efficiency of the Military Environmental Security System through the Implementation of Advanced Technical Means	347
Bayramov A., Suleymanov S. GPRS Radio Communication For AI-Based Measurement And Control Complex	352
Bondarchuk V., Matsui A. Electromagnetic Testing and Failure Prediction of Antenna Systems Using Intelligent Technologies	356
Huk O., Matiko F., Skibel P. Features of automation of gas meter verification process using bell-provers	358
Khliebnikov M., Matsui A., Les Y. Rationale for selecting the type of grinding balls in energy-efficient invariant control of ore comminution	361
Klimov S., Khitrov I. Analysis Of Oxygen Sensor Dynamics For Catalytic Converter Diagnostics Using On-Board Logging Data	364
Shepel O., Matsui A. Transient Frequency Spectrum Analysis for Single Line-to-Ground Fault Location in Insulated Power Systems	366
Tsukanov O., Reut D. Remote Control System for a VTOL UAV Stand with Computer Vision Elements	369
Yarmolenko V., Serbul O., Izovita O. Analysis of parametric and time-angle methods for determining the distance and positioning of unmanned aerial vehicles	371
Вискорко В., Литвиненко О., Христюк А. Експериментальне дослідження впливу розташування вантажу на енергоефективність квадрокоптера	373
Лимич В., Федоришин Р. Визначення параметрів рухомого вікна для опрацювання сигналу віброакселерометра	376

Полховський І., Маланчук Є., Стець С. Дослідження енергоефективності частотних перертворювачів при автоматизованому керуванні асинхронним електроприводом	380
Поляков В. Придушення коливань механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда	383
Сафоник А., Полюхович О., Антикало М. Сучасні методи ідентифікації тяжких металів у водному середовищі	386
Сафоник А., Таргоній І., Ковальчук Н. Розробка системи регулювання струму в електрокоагуляційній установці	388
Семенко Б.-Р., Христюк А., Мельник І. Розробка прототипу польотного контролера на базі мікроконтролера ESP32	390
Семенко Б.-Р., Христюк А., Присяжнюк О. Розробка адресної оптопари як ефективного рішення для масштабування систем керування	393
Филипчук Л., Котик М. Вимірювання та контроль параметрів pH та Eh при очищенні води	397
Таргоній О., Таргоній І. Розробка системи місцеве/дистанційне керування дуттєвим вентилятором сушильної установки	399
СЕКЦІЯ 8. ЦИФРОВІ РІШЕННЯ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ	
Akhundov R., Islamov I. Potential Threats to Environmental Security of the Armed Forces under Radiation and Chemical Hazards	402
Akhundov R., Mammadov E. Adaptive Operational Adaptive Modes of the Military Environmental Security System	406
Akhundov R., Islamov I. Military Environmental Security under Radiation and Chemical Threats	411
Shulgan R, Yanchuk O, Nikolaichuk K, Kibysh A. Geoinformational support for modeling the efficiency of crop cultivation in crop rotations	417
Басюк Т., Корбутяк В., Федорчук А. Геоінформаційні аспекти планування заходів адаптації до змін клімату в малих містах України (на прикладі м. Острог)	420
Волощук В., Новіков П., Степанець О., Захарченко А., Білоус І. Інтелектуальна система теплозабезпечення будівель із застосуванням технології цифрового двійника	424
Іванов Ю., Ковальчук Н., Буднік З. Використання ГІС-технологій та даних космічної зйомки для аналізу динаміки площ лісового фонду (на прикладі ДП «Костопільське лісове господарство»)	426
Калько А., Басюк Т., Яковишина М., Конарівський Б. Аналіз динаміки розливу річки Стир методами дистанційного зондування Землі	430
Корбутяк В., Статник І., Мошинський В., Франчук М. Геоінформаційний аналіз впливу мережі каналів на формування поверхневого стоку масиву Сомине Рівненського природного заповідника	433
Bakuridze A., Givradze O., Didmanidze I., Didmanidze T. Idempotent elements of the semigroup B_X (D) defined by semilattice of the class $\sum_2(X,5)$	436

СЕКЦІЯ 1

ГІДРОІНФОРМАТИКА, ГІДРОТЕХНІКА ТА УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ

MCIT
Modeling, control & information technologies

The Weaponization of Water: Environmental Policy as a Tool of Russian Hybrid Warfare in the Caspian Sea

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.001

Fuad Chiragov
National Defense University of Azerbaijan
Baku, Azerbaijan
chiragovfuad@gmail.com

Abstract — **This article analyzes the Russian Federation's strategic weaponization of environmental policy in the Caspian Sea region as a sophisticated, non-kinetic instrument within its general hybrid warfare strategy. Avoiding the general assumption of environmental degradation as a byproduct of war, this analysis assumes that Russia is taking conscious measures in applying natural resources and environmental disasters as an heterogenous policy to accomplish political and economic objectives. By dominating the Caspian's principal water source, the Volga River, Moscow acquires the ability to inflict disproportionate, cumulative harm on the economies and legitimacy of governments of littoral states—specifically Kazakhstan, Azerbaijan, Turkmenistan, and Iran—without crossing the threshold of formal armed conflict. This piece outlines the mechanisms of this weaponization of the environment in physical and economic arguing that it is a central and expanding frontier of international competition, a key challenge to traditional understandings of national security.**

Keywords — Hybrid warfare, environmental weaponization, Volga River, Caspian Sea, non-kinetic instruments, hydropolitical leverage

Introduction

The traditional concern of national security, which has long been preoccupied with seeming and tangible military threats, is being fundamentally disrupted by the intensifying convergence of geopolitical competition and the accelerating ecological shift. The imperative of this shift is underscored by the experience of national policymakers directly confronting these forces. For instance, last September, Azerbaijani President Ilham Aliyev, addressing the UN General Assembly, reported that the Caspian Sea was drying up very fast, stating that the main reason is not global warming and that the regional ecology is becoming a great security concern [6]. It is not coincidence that immediately after the Second Karabakh War, Azerbaijan hosted COP-29 signifying the increased strategic importance of environmental security.

Within the broader context of hybrid war—having as its hallmark the combined use of non-kinetic capabilities to attack the vulnerability of an adversary—the environmental sphere provides a unique operational environment. Hybrid threats are distinguished by co-ordinated action aimed at attacking systemic vulnerabilities, operationally existing in the "grey zone" short of declared armed conflict. The environmental sphere is best suited for this kind of conflict on account of its complexity, protracted character, and intrinsic connection to matters of vital national interests such as food and water security.

The central argument of this analysis is that Russia uses the environmental domain to pursue its main hybrid warfare goal of destabilizing the legitimacy and functional capacity of Caspian littoral nations. This article argues that Russia is strategically recalibrating the environmental threat of the Caspian Sea's shrinking from a basic threat multiplier to an immediate, low-attribution vehicle of coercive power and system destabilization. It is not a case of environmental degradation as a consequence of war but an instance of investigating intentional, conscious methods where natural resources are used as a tool of statecraft, at times divorced from actual ecological concerns. [12, 14].

Russian political interests are underpinned by the settled intentionality of regulation of flow for national priorities, announcement of unilateral legal jurisdiction, and official public accusations from Kazakhstan, Azerbaijan, and Iran. As global environmental changes actively shape power balances, the Caspian Sea crisis demonstrates how these "actorless challenges" become reshaped from passive security multipliers into active agents of strategic influence.

A. THEORETICAL FRAMEWORK OF HYBRID WARFARE IN THE ENVIRONMENTAL DOMAIN

Hybrid conflict is a complex mixing or blending of conventional military force with unconventional instruments of subversion. It is defined by the widespread and synchronized use of non-kinetic operations, from economic pressure to cyber operations, diplomatic coercion, and increasingly, manipulation of the natural environment. Ultimately the larger strategic objective of hybrid war is political, subverting the legitimacy and capability of an intended target state to act. By systematically eroding the social compact which

binds the state and its people together, hybrid actors diminish the basis of public trust. [8, 13].

In practical terms, hybrid activity occurs in the contested "grey zone," a phenomenon that is understood as a continuum ranging from peaceful influence through various forms of interference up to war. The current situation where environmental challenges are described in the collective sense as "actorless" benefits the hybrid actor as ambiguity becomes a source of power. Environmental change can significantly damage and compromise the economy, political stability, or resource base of a country. These kinds of environmental challenges act as vulnerability multipliers and may escalate danger in the domains of food security, energy shortages, and land conflicts. By meaningfully integrating strategic policy manipulation with the backdrop of seemingly inevitable climate change, perpetrators can deliberately deny and avoid from responsibility. The diffusion of lines informs the instability with a natural or incidental quality that meaningfully prevents the establishment of retaliatory or preventative counter-responses. [3, 11].

The Geopolitics of Caspian Sea Crisis

With its colossal hydrocarbon resources, the Caspian Sea is also on a geopolitically crucial crossroads and alternative transport routes—such as the East-West which is known as Middle Corridor and the North-South Corridor. Over 10 million livelihoods depend on this world's largest enclosed inland water body in fragile balance of nature. The crisis with historically low water level has started to aggravate geopolitical tensions among the Caspian littoral states. Sea level has been in constant decrease with extremely accelerated intensity over the last decades, already becoming a record low. Projections forecast another drop of 9 to 18 meters by the close of the 21st century, reducing the surface area of the sea by 25%. [1].

Its primary causes are increased evaporation with increased temperature and decreased inflows from the rivers, primarily the Volga River, which contributes some 80% of the sea's water [2, 5]. Technologically the Volga is a Russian river and has only Moscow as the only sovereign steward of the lifeline of the Caspian Sea. The enormous structural reliance of the whole basin on the Volga River places the water security of the entire region under Russian decision-making.

The impact is deep and serious. The disintegrating coast and receding water level are making it hard for ships and tankers to reach such principal ports as Baku (Azerbaijan), Aktau (Kazakhstan), and Turkmenbashi (Turkmenistan), necessitating expensive and constant dredging. For offshore production, the falling water levels threaten to strand facilities, like Kazakhstan's multibillion Kashagan oil field, high on dry land onshore, and these need expensive, and complicated re-engineering. The steady deflation interferes with operations and transport, and export and hydrocarbon production become more burdensome and costly, threatening most of the region's economy.

II. MECHANISMS OF ENVIRONMENTAL WEAPONIZATION IN THE CASPIAN

The implementation of environmental weaponization by Russia relies on a carefully coordinated set of non-kinetic tactics executed across strategic domains, designed to leverage ambiguity and maximize long-term systemic damage.

Hydropolitical Leverage and Control

The legal imbalance which grants Russia the capability to apply leverage through its unilateral management of the Volga River turns standard state resource administration into an ongoing instrument of geopolitical domination. [10]. Russia does not even have to make explicit threats to shut off the water supply, its mere continuance of the legal status quo, when it puts domestic objectives first, is sufficient leverage. Hence, other coastal nations cannot even demand from Russia for water management legally they only can bargain and ask for the cooperation on this problem.

The Russian officials publicly acknowledge directing flows for local commercial and ecological uses, so as to facilitate spawning of commercially relevant sturgeon in valuable habitats of the Astrakhan region. This policy decision, one which benefits profitable domestic commercial fishing interests to the detriment of downstream Caspian health, is interpreted as a politically driven disregard for regional stability and sovereign interests of the other four littoral states.

This advantage of Russia is agonizingly magnified by the escalating climate crisis. While climate change is a main reason for the sea level reduction, the ecological uncertainty generated by this same aftereffect exponentially increases the strategic value of the Volga water under Russian control. As the globe warms Russia is not missing this opportunity to weaponize the ecological disaster through controlling the critical relief valve, thereby making its hydropolitical advantage increasingly stronger in the region where it has geopolitical ambitions.

Other Caspian countries have complained about politically motivated flow reduction. The head of Iran's Department of Environment, Ali Salajegheh, issued a rare public declaration that the "closure of important gates to the Caspian Sea" and thus the Volga River is a main cause of the crisis. In Kazakhstan, the diplomatic strain arose following parliamentary hearings of the Volga's flow ahead of a resignation by a deputy water resources minister, pointing to the geopolitical nature of this issue. [7].

Inflicting Structural Economic Damage

The most immediate victim of the ecological catastrophe which is weaponized by Russia is Kazakhstan. Between 2001 and 2022, the northeastern Caspian surface of the Kazakh shoreline shrunk by 39%, while the shoreline receded by up to 37.25 kilometers.

This physical degradation directly affects radical national economic exposure of Kazakhstan whose energy complex rests on the large hydrocarbon projects like the Kashagan oil field. Water levels have dropped so significantly that support vessels can no longer safely reach the drilling rigs, jeopardizing the operational

viability of the entire facility. Also, the key logistic hubs, such as seaports Aktau and Kuryk, which are essential for integration into strategic corridors such as China's Belt and Road Initiative, are taking costly emergency action to reroute logistics and adapt infrastructure.

The damage to infrastructure for these essential assets itself reinforces Russian economic dominance. The increased operational risk to the Volga River due to either climate or policy induced sea level drop makes foreign investment in Kazakhstan less attractive and adds complexity to regulatory compliance. Consequently, the uncertainty pushes Kazakhstan, de facto, to rely on Russian controlled export pipelines, namely the Caspian Pipeline Consortium (CPC). By restricting the necessary flow from the Volga River to ensure safe navigation and operations, Russia indirectly counters Kazakhstan's policy seeking economic diversification and independence without imposing direct economic sanctions.

Overt Political Pressure and Energy Obstruction

Russian politicians, propogandists and prominent members of the ruling United Russia party regularly make blatant statements denying statehood and sovereignty of the former Soviet states affirming Russian proprietorship over their territories. Their rhetoric is designed to maintain an ever-present state of political instability, reminding the former soviet states of their vulnerabilities.

The open and overt political pressure are reinforced by structural economic levers. Russia actively uses its geopolitical influence to encircle the economic autonomy of neighbors by closing alternative energy corridors. One such target is the potential Trans-Caspian gas pipeline, which might be crucial not only to Turkmenistan and Azerbaijan but also energy security of the European continent. Moscow uses voiced environmental concerns over the pipeline's potential effect as a club to possibly "freeze the whole project," in effect exercising a geopolitical veto over its neighbors' energy infrastructure development. This kind of obstructionist demand prevents the formation of coherent regional energy policies that bypass Moscow, making Russia the unavoidable transit point. The strategy maintains strategic fragmentation among the littoral states, retaining Russia its position as the unavoidable security and energy intermediary for the region.

III. STRATEGIC RATIONALE AND OBJECTIVES

The documented statements and actions reveal a consistent strategic rationale for Russian motives in the Caspian Sea, which aligns perfectly with the goals of hybrid warfare:

Maintain Economic Dominance.

Russia aims to maintain its monopoly on regional energy transport by preventing alternatives, such as the Trans-Caspian pipeline, and allowing the environmental catastrophe to devastate the logistical viability of competing non-Russian export routes (e.g., the Middle Corridor through the Caspian Sea). By disrupting or dismantling the infrastructure of its competitors, it ensures constant dependence on its transport networks.

Impose Political Subordination

Moscow is implementing a "pincer strategy." Open threats to sovereignty among former Soviet littoral states create a climate of political instability, while more subtle actions, such as dominance over the flow of the Volga, secure lasting, systemic dependence on Russia. The goal is less direct territorial control than to establish a relationship of subordination, rendering governments more compliant when negotiating basic questions of structural dependence.

Hybrid environmental warfare is designed to be long-lasting by imposing sustained liability on the target state. Unlike conventional destruction, damage to key environmental infrastructure, such as croplands or waterworks, necessitates astronomically expensive and long-term cleanup and rebuilding. This again maximizes destabilization beyond the conflict, ensuring that the attacked society remains physically, psychologically, and economically weak - and diverts critical resources - thereby achieving the overarching hybrid purpose of destabilization in the absence of hostilities. [9].

CONCLUSION

Russia's activities represent an intricate and purposeful weaponization of environmental policy that goes beyond the traditional hybrid methods of cyber and information warfare. Russia has repurposed a commonplace ecological issue into a tool of powerful coercive action by exploiting its control of the Volga River as a mechanism to facilitate and extend the effects of a larger climatic crisis. This enables Russia to steadily undermine the economic viability, political stability, and legitimacy of its Caspian neighbors—Kazakhstan primarily, but Azerbaijan, Turkmenistan, and Iran as well—while also being able to do so with plausible deniability. The dynamics establish the validity of President Aliyev's call for international community and UN to act and statement regarding the importance of the ecology of the region as a top tier security threat mission that is, unavoidably and necessarily, nestled in the reality of diplomacy and geopolitics.

REFERENCES

[1] A. Amangeldina, "Aral Sea Syndrome: Why Is the Caspian Sea Shrinking?", March 4, 2025, Carnegie Endowment, accessed September 29, 2025, https://carnegieendowment.org/russia-eurasia/politika/2025/03/caspian-environment-crisis?lang=en

[2] A. Buber, M.Bolgov and V.Buber, "Statistical and Water Management Assessment of the Impact of Climate Change in the Reservoir Basin of the Volga–Kama Cascade on the Environmental Safety of the Lower Volga Ecosystem", April 4, 2023, MDPI, accessed September 29, 2025, https://www.mdpi.com/2076-3417/13/8/4768

[3] C. M. Briggs, "Climate Change and Hybrid Warfare Strategies", December 2020, Journal of Strategic Security 13(4):45-57, accessed October 1, 2025, https://www.researchgate.net/publication/347699843_Climate_Change_and_Hybrid_Warfare_Strategies

[4] D. Acemoglu, M. Golosov, A. Tsyvinski and P. Yared, "A Dynamic Theory of Resource Wars", The Quarterly Journal of Economics (2012)127, 283–331, accessed October 1, 2025, https://economics.mit.edu/sites/default/files/publications/A%20Dynamic%20Theory%20of%20Resource%20Wars.pdf

[5] E. Safarov, S. Safarov and E. Bayramov, “Changes in the Hydrological Regime of the Volga River and Their Influence on Caspian Sea Level Fluctuations”, June 20, 2024, MDPI, accessed September 29, 2025, https://www.mdpi.com/2073-4441/16/12/1744

[6] Ilham Aliyev addressed 80th session of UN General Assembly, September 25, 2025, https://president.az/en/articles/view/70187

[7] Iranian Official Blames Russia For Caspian Sea Water Reduction, August 7, 2023, Iran International, accessed September 29, 2025, https://www.iranintl.com/en/202308071134

[8] M. Bizzotto and A. Altomare, “Weaponization of Natural Resources” | The CoESPU MAGAZINE - the online quarterly Journal of Stability Policing" no. 2 - 2024, accessed October 1, 2025, https://www.coespu.org/articles/weaponization-natural-resources

[9] M. V. Kazemi, “The Negative Consequences of the Declining Water Level in the Caspian Sea”, March 5, 2025, International Peace Studies Center – IPSC, accessed September 29, 2025, https://peace-ipsc.org/2025/03/05/the-negative-consequences-of-the-declining-water-level-in-the-caspian-sea/

[10] M. Schletterer, H. Middelkoop, S.I. Shaporenko, V.V. Kuzovlev, A.E. Minin, G.J. Van Geest, K.Górski, “The Volga: Management issues in the largest river basin in Europe”, February 25, 2018, Wiley, accessed September 29, 2025, https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/381273/Schletterer_et_al_2019_River_Research_and_Applications.pdf?sequence=1

[11] Q. Vuong, V. La and M. Nguyen, “Weaponization of Climate and Environment Crises: Risks, Realities, and Consequences”, 2023, OSF Preprints v9qrm, Center for Open Science, accessed October 1, 2025, https://ideas.repec.org/p/osf/osfxxx/v9qrm.html

[12] R. Ricci, “The Caspian Sea is drying up, and Kazakhstan asks Russia to collaborate in managing the Volga River”, Materia Rinnovabile, accessed September 29, 2025, https://www.renewablematter.eu/en/caspian-sea-drying-up-kazakhstan-russia-volga-river

[13] T. Ide, M. F. Johnson, J. Barnett, F. Krampe, P. Le Billon, L. Maertens, … I. Vélez-Torres, (2023). The Future of Environmental Peace and Conflict Research. Environmental Politics, 32(6), 1077–1103. https://doi.org/10.1080/09644016.2022.2156174

[14] Z. Shiriyev, Russia's War in Ukraine Is Aggravating the Caspian Sea Environmental Crisis”, July 23, 2024, Carnegie Endowment, accessed September 29, 2025, https://carnegieendowment.org/russia-eurasia/politika/2024/07/caspian-sea-ecology?lang=en

MCIT Modeling, control & information technologies

Risk and Hazard Analysis of Riverbank Filtration Water Intakes for Water Safety Planning

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.002

Serhii Klimov
National University of Water and Environmental Engineering, Institute of Energy, Automation, and Water Management
Rivne, Ukraine
s.v.klimov@nuwm.edu.ua

Serhii Martynov
National University of Water and Environmental Engineering, Institute of Construction, Architecture, and Design
Rivne, Ukraine
s.y.martynov@nuwm.edu.ua

Serhii Kunitskyi
National University of Water and Environmental Engineering, Research Department
Rivne, Ukraine
s.o.kunytskiy@nuwm.edu.ua

Larysa Kupchyk
National University of Water and Environmental Engineering, Institute of Economics and Management
Rivne, Ukraine
L.y.kupchyk@nuwm.edu.ua

Abstract — **Water Safety Plans (WSPs) are a proactive framework recommended by the World Health Organization to ensure the safety of drinking water through risk assessment and risk management along the entire supply chain – from catchment to consumer. This study presents a methodology for identifying and assessing hazards and hazardous events in riverbank filtration (RBF) water supply systems at the initial WSP development stage. A pilot investigation was conducted for a small urban settlement in the Ivano-Frankivsk region, Ukraine, where groundwater abstraction is performed from two rivers, including the Dniester. Bibliometric analysis of 3,879 publications in Scopus (as of 2025) identified key approaches and gaps in WSP-based risk assessment. Field investigations under the project Climate-Resilient Management for Safe Disinfected and Non-Disinfected Water Supply Systems - 101081980 - SafeCREW - Horizon-cl6-2022-zeropollution-01 included 2,956 measurements of physicochemical and microbiological indicators. Main hazards identified were microbial contamination during warm seasons and clogging of infiltration zones due to increased turbidity in the Dniester River. Risk assessment demonstrated medium to high levels of vulnerability associated with reservoir maintenance and seasonal water quality fluctuations. The results provide a structured basis for WSP implementation and adaptation of EN 15975-2:2022 and ISO 31000:2018 principles in small-scale water systems using riverbank filtration.**

Keywords — Water Safety Plan; Risk Assessment; Risk Management; Hazard Analysis; Water Supply; Environmental Monitoring, Sensor-based Monitoring

I. INTRODUCTION

A. Justification of Research Relevance

In the 21st century, there has been a significant reduction in the availability of acceptable-quality water worldwide, particularly in Ukraine. This is due to excessive consumption, the pollution of watercourses and groundwater aquifers, intensive agriculture, climate change, and the financial and personnel-related inability to implement modern water treatment, disinfection, distribution and selection technologies., among other reasons, [1].

An important mechanism for addressing water resource challenges is Hydroinformatics, which, through the integration of data, digital modelling, and decision support systems [1], and with the application of Artificial Intelligence (AI) [2], has evolved into a socio-technical dimension. This transformation enables a shift from reactive to interactive decision-making processes that engage all stakeholders [3], [4], [5].

This approach is also realized through the procedures of Water Safety Plan (WSP) formulation procedures. The systematic approach recommended by the World Health Organization (WHO) [6], aims to reduce risks in drinking water supply systems, from the catchment area to the end user.

B. Problem Statement

The purpose of this study is to identify hazards and hazardous events, conduct their analysis, and validate existing control measures at the initial stage of Water Safety Plan (WSP) development for water supply systems, focusing on Modules 1 – 4 [6].

C. Review of the Current State of Research

An analysis of existing methodologies for risk assessment of drinking water catchments, their strengths, and weaknesses is presented in [7]. The following risk assessment methods were considered: Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP) developed by the U.S. Food and Drug Administration (FDA), [8], and its application to drinking water supply systems [9]; World Health Organisation Water Safety Plans (WSP), [6];

Australian Standard AS/NZS 4360:2004: Risk management, [10]; and The Australian Drinking Water Guidelines (the Guidelines) [11]. The study emphasizes the importance of initial water quality verification, which is valuable for identifying key quality issues, guiding risk assessment, and developing a comprehensive understanding of the catchment and water source conditions. To identify causes and consequences of hazardous events and to prioritize risk management, [12] proposes the Failure Experience Improvement System (FEIS), which maintains a continuously updated database of failures, their causes, and consequences – including data from social media analysis.

More recent studies present WSP implementation results for the drinking water system of Mortara (Pavia, Italy) [13] where risk assessment was performed using a semi-quantitative approach. Another relevant example comes from Serbia [14], where a Field Guide to Improving Small Drinking-Water Supplies: Water Safety Planning for Rural Communities [15] was developed and applied to rural small-scale systems. The integrated Water and Sanitation Safety Planning (iWSSP) approach, implemented at pilot sites, essentially mirrors WSP methodology while combining several modules (3-4, 6-8, and 9-10), omitting some direct impact assessments and management procedures [14].

Accurate risk assessment also requires expert surveys following WSP stages. Such questionnaires [16] include inquiries on control measures implemented across system zones:

- Groundwater protection area,
- Treatment and distribution,
- Consumers.
- Risk Assessment and Risk Management (RA/RM) are also evaluated through organizational practices such as:
- Communication with consumers (websites, surveys, social media, information sessions, etc.);
- Staff and subcontractor training;
- Engagement and communication with stakeholders, including municipalities, water resource authorities, health departments, emergency services, and environmental organizations.

A significant example of RA/RM application is the Netherlands' national practice of cyclic WSP-based risk analysis and management, as described in RIVM Report 2017-0036 [17], which ensures continuous improvement and feedback integration.

An important study on the application of risk analysis and risk management (RA/RM – risicoanalyses en risicomanagement) in the Netherlands, which covers all steps of the WSP and is implemented as a cyclical process with room for improvement, is the Risk Analysis and Risk Management of Drinking Water Production in the Netherlands, RIVM Rapport 2017-0036, H.H.J.L. van den Berg et al. [16].

II. METHODS

A bibliometric analysis of the literature was carried out in two stages: a systematic search and a snowball search [18]. The systematic search followed the PRISMA methodology (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [19].

The search query "*water* AND *safety* AND *plan*" was applied on Scopus (www.scopus.com) as of October 1, 2025. The database contained 3,879 documents (up to 01.10.2025), among which the most cited works were [20] (1,091 citations in Scopus – 98th percentile), [21] (622 citations), and [22] (182 citations). To refine the dataset, relevant keywords such as "*Water Safety Plans*" and "*Water Safety Plan*" were applied, reducing the sample to 293 documents.

Fig. 1 shows the co-occurrence network and relative frequency of key terms found in document keywords, titles, and abstracts. The proportional node size reflects the relative number of publications and their citation rates, while the link thickness indicates the frequency of co-occurrence.

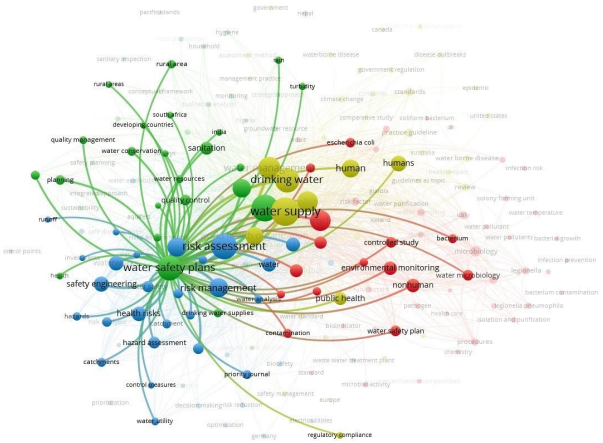


Fig. 1. Search results in the Scopus abstract scientometric database for search terms «*water* AND *safety* AND *plan*»

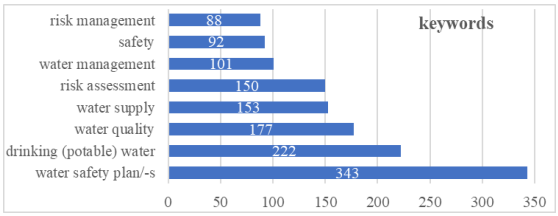


Fig. 2. Number of publications with corresponding keywords

When performing risk assessment, it is essential to follow the principles of risk management outlined in DSTU ISO 31000:2018 – Risk Management: Principles and Guidelines [23]. As one of the core principles, inclusiveness ensures stakeholder engagement, enhances awareness among the WSP team and the population [24], and increases the justification of proposed control measures.

Because WSP guidelines provide limited direction on incorporating various risk assessment methods and prioritization, it is appropriate to apply the European Standard EN 15975–2, which defines fundamental RA/RM elements and is implemented in Ukrainian legislation as DSTU EN 15975-2:2022 "Safety of Drinking Water Supply – Guidelines for Risk and Crisis Management – Part 2: Risk Management" [25].

Additionally, for the consideration of "crisis" scenarios, DSTU EN 15975-1:2022 (EN 15975-

1:2011+A1:2015, IDT) [26] should be applied. These standards are thoroughly analyzed in [27].

III. OBJECT OF STUDY

The object of this study is a small town in the Ivano-Frankivsk region, Ukraine, with a daily water supply production of up to 1,000 m³/day and a population of up to about 5,000 inhabitants. Water abstraction is based on the principle of riverbank filtration, where filtrate is drawn into wells from two rivers, one of which is the Dniester. The catchment area of the smaller, cleaner tributary (let's call it Basic River) is less than 1,500 km², while the Dniester River basin area is approximately 14,700 km².

IV. RESULTS:

The introduction of Water Safety Plans (WSPs) decreases the risk of a reduction or interruption to the water supply, as well as the spread of contamination, in urban drinking water supply systems. This risk can arise anywhere from the catchment basin to the end user [6]. Drinking water safety planning is carried out in four stages: development, implementation, verification and review. During the development stage of the WSP, ten main stages (modules) are formed [6]. The first step (module 1) is to establish a multidisciplinary WSP team with a collective understanding of all components of the water supply system, from the catchment basin to the consumer. This team will then lead the development and implementation of the WSP. Module 2 involves the WSP team describing the water supply system from the catchment to the consumer. Our research considers the centralised water supply scheme of the facility shown in Fig. 3.

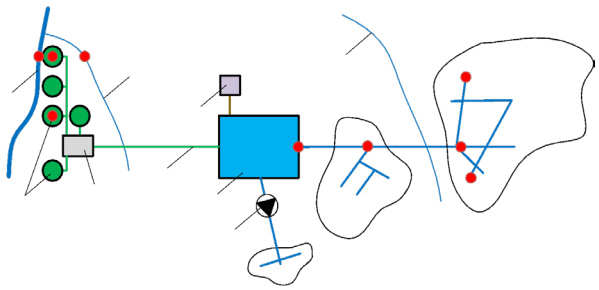


Fig. 3. Water supply scheme: 1 – Dniester River; 2, 3 – tributaries of the Dniester River; 4 – water intake wells; 5 – switching chamber and water metering unit; 6 – collecting water pipe; 7 – clean water reservoirs; 8 – disinfectant dosing unit; 9 – booster pump; 10, 11, 12 – settlements with a centralized water supply network

The main stakeholders, are identified in Module 3, along with the hazards and hazardous events, with the involvement of their representatives. At this stage, the knowledge base required for all subsequent risk management steps is formed. Clear identification of hazards and events is necessary for risk ranking, selecting control measures, and monitoring. The specific features of a water supply system must be taken into account, such as hazards related to the amount of water available to users (Q); microbiological hazards (M); acceptability of water in terms of taste, colour and odor (A); and contamination with radionuclides (R) and chemically hazardous substances (C). Hazard identification establishes a link between system description and risk assessment.

Fig. 4 summarises the hazards and hazardous events of the research object, as identified by the WSP group.

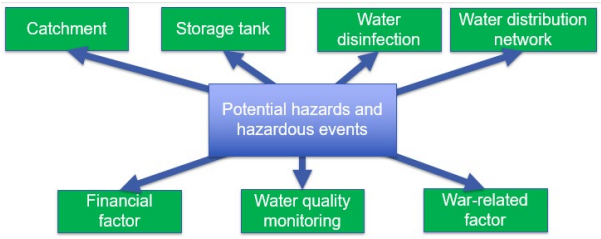


Fig. 4. Potential hazards and hazardous events at the research site

Below, we consider two examples of water-related hazards: 1) Intensive microbial growth in river water during the warm season and subsequent migration into intake wells; 2) Clogging (colmatation) of well infiltration zones, leading to increased hydraulic resistance. (See Table 1, which shows a sample from the set of indicators).

To assess microbial contamination likelihood, under the Horizon Europe project Climate-Resilient Management for Safe Disinfected and Non-Disinfected Water Supply Systems - SafeCREW during 2024–2025 774 measurements of ten microbiological indicators were performed (including Total coliforms, E. coli, Enterococci, Coliphages, Salmonella, Pseudomonas aeruginosa, helminth eggs and larvae, protozoan oocysts and cysts, total microbial count at 37 °C).

Physicochemical parameters such as conductivity, temperature, pH, and free/total chlorine were determined on-site using portable meters (GMH3410, Ezodo 8200M, Ezodo 7200, Milwaukee MI404 Photometer), while other indicators were analyzed in laboratories, in particular in the Hydrochemical Laboratory of NUWEE (Certificate PT-046/025). In total, 2,956 measurements across 28 indicators were conducted.

Clogging risk (colmatation of well infiltration zones) increase with turbidity in river water; therefore, turbidity analysis was performed for both rivers (Fig. 5). The average annual turbidity in the Basic River was 81 g/m³, whereas in the Dniester River it reached 180 g/m³. The maximum turbidity was 8,100 g/m³ for the Dniester compared to 3,300 g/m³ for the Basic River. The duration of high-sediment exposure (>100 g/m³) was about 55 days per year for the Dniester River and only 13 days per year for the Basic River, indicating a higher risk of well clogging and filtration efficiency loss when operating wells with water infiltrating from the Dniester River.

TABLE I. RISK ASSESSMENT (SAMPLING)

Hazardous event	Type of hazards	Like–lihood	Severity	Risk assessment	Level of risk
Intensive development pf microbial contamination in the river (X) during the warm season and its subsequent entry into the catchment wells (Y).	M	2	4	8	M
Clogging (Colmatation) of the well's filter zones (X), which causes an increase in hydraulic resistance (Y).	Q, R	2	3	6	M
Failure in the pump unit (X), which will lead to the stoppage of water supply to the storage tank (Y).	Q, C, M, R	2	1	2	L
Failure of catchment pumps (X) due to a power grid malfunction caused by flooding of the switchboard during the flood (Y).	Q	1	4	4	L
Freezing of the main water pipeline (X) supplying water to the storage tank, which may lead to the emptying of the storage tanks (Y).	Q	2	3	6	M
Poor maintenance of storage tanks (ultimately cleaning and disinfection) (X) increases the risk of microbial contamination of the water in the storage tank and the subsequent spread of contaminants in the water supply network (Y).	M, C	5	3	15	H

Risk levels were classified as Low (≤ 5), Medium (6–14), and High (≥ 15).

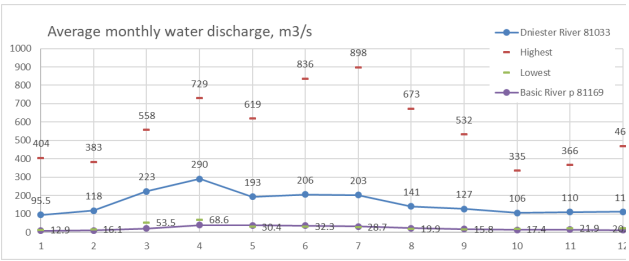


Fig. 5. Average monthly sediment discharge of the study site

V. CONCLUSIONS

The bibliometric analysis revealed increasing global interest in WSP-based risk management, confirming the relevance of integrating ISO 31000:2018 and EN 15975-2:2022 standards into Ukrainian practice.

The developed hazard identification framework allows systematic evaluation of events affecting RBF systems, particularly microbial contamination and clogging of infiltration zones.

Field data showed higher turbidity and suspended sediment loads in the Dniester River, increasing the risk of well clogging and reduced filtration capacity compared to the smaller tributary.

Microbiological monitoring identified a medium-to-high risk of contamination in periods of elevated water temperature and inadequate reservoir maintenance.

The obtained results enable prioritization of control measures at critical points and support the development of site-specific Water Safety Plans for small municipal systems relying on riverbank filtration.

Future research should focus on the integration of sensor-based monitoring and AI-driven data interpretation to improve early warning and adaptive management within WSP frameworks.

REFERENCES

[1] Z. Vojinovic and M. B. Abbott, 'Twenty-Five Years of Hydroinformatics', Water, vol. 9, no. 1, p. 59, Jan. 2017, doi: 10.3390/w9010059.

[2] A. Jones, J. Horsburgh, C. J. Bastidas Pacheco, C. Flint, and B. Lane, 'Advancing Hydroinformatics and Water Data Science Instruction: Community Perspectives and Online Learning Resources', Front. Water, vol. 4, p. 901393, June 2022, doi: 10.3389/frwa.2022.901393.

[3] Z. Vojinovic and M. B. Abbott, Flood Risk and Social Justice 2025. IWA Publishing, 2012.

[4] D. Loucks, 'Hydroinformatics: A Review and Future Outlook', Camb. Prisms Water, vol. 1, pp. 1–26, Sept. 2023, doi: 10.1017/wat.2023.10.

[5] C. Flint, A. Jones, and J. Horsburgh, 'Data Management Dimensions of Social Water Science: The iUTAH Experience', JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc., vol. 53, Sept. 2017, doi: 10.1111/1752-1688.12568.

[6] World Health Organization, Water safety plan manual: step-by-step risk management for drinking-water suppliers, second edition. Geneva: World Health Organization, 2023. Accessed: Sept. 23, 2025. [Online]. Available: https://iris.who.int/handle/10665/366148

[7] R. Miller, B. Whitehill, and D. Deere, 'A national approach to risk assessment for drinking water catchments in Australia', Water Supply, vol. 5, no. 2, pp. 123–134, Sept. 2005, doi: 10.2166/ws.2005.0029.

[8] 'Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP) | FDA'. Accessed: Oct. 01, 2025. [Online]. Available: https://www.fda.gov/food/guidance-regulation-food-and-dietary-supplements/hazard-analysis-critical-control-point-haccp

[9] A. H. Havelaar, 'Application of HACCP to drinking water supply', Food Control, vol. 5, no. 3, pp. 145–152, Jan. 1994, doi: 10.1016/0956-7135(94)90074-4.

[10] ‘AS/NZS 4360:2004 - Risk management (FOREIGN STANDARD)’. Accessed: Oct. 01, 2025. [Online]. Available: https://webstore.ansi.org/standards/sai/NZS43602004

[11] ‘Australian Drinking Water Guidelines | NHMRC’. Accessed: Oct. 01, 2025. [Online]. Available: https://www.nhmrc.gov.au/about-us/publications/australian-drinking-water-guidelines

[12] A. Lukas, E. Mayr, L. Richard, and R. Perfler, ‘Supporting the Water Safety Plan (WSP) approach with the Failure Experience Improvement System (FEIS)’, Water Sci. Technol. Water Supply, vol. 11, no. 3, pp. 288–296, 2011, doi: 10.2166/ws.2011.049.

[13] S. Sorlini, M. Biasibetti, A. Abbà, M. C. Collivignarelli, and S. Damiani, ‘Water Safety Plan for drinking water risk management: the case study of Mortara (Pavia, Italy)’, Ambiente E Agua - Interdiscip. J. Appl. Sci., vol. 12, no. 4, pp. 513–526, June 2017, doi: 10.4136/ambi-agua.2102.

[14] H. van den Berg et al., ‘Experiences from integrating water and sanitation safety planning in small systems in rural Serbia’, J. Water Health, vol. 21, no. 12, pp. 1772–1783, Nov. 2023, doi: 10.2166/wh.2023.204.

[15] ‘A field guide to improving small drinking-water supplies: water safety planning for rural communities’. Accessed: Oct. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289058414

[16] H. H. J. L. van den Berg, L. Friederichs, J. F. M. Versteegh, P. W. M. H. Smeets, and A. M. de Roda Husman, ‘How current risk assessment and risk management methods for drinking water in The Netherlands cover the WHO water safety plan approach’, Int. J. Hyg. Environ. Health, vol. 222, no. 7, pp. 1030–1037, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ijheh.2019.07.003.

[17] H.H.J.L. van den Berg, L. Friederichs, J.F.M. Versteegh, P. Smeets, and A.M. de Roda Husman, ‘Risicoanalyse en risicomanagement van drinkwaterproductie in Nederland’, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM, RIVM Rapport 2017-0036, 2017. Accessed: Oct. 02, 2025. [Online]. Available: https://rivm.openrepository.com/entities/publication/d06d9ec3-f05e-4bd6-9731-6ca7a52e88bd

[18] N. Fötsch, ‘LibGuides: Literature search: Snowball and citation search’. Accessed: Jan. 01, 2024. [Online]. Available: https://libguides.ru.nl/literaturesearch/snowball

[19] M. J. Page et al., ‘PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews’, BMJ, vol. 372, p. n160, Mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n160.

[20] M. Arias-Estévez, E. López-Periago, E. Martínez-Carballo, J. Simal-Gándara, J.-C. Mejuto, and L. García-Río, ‘The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources’, Agric. Ecosyst. Environ., vol. 123, no. 4, pp. 247–260, 2008, doi: 10.1016/j.agee.2007.07.011.

[21] A. Montanari et al., ‘“Panta Rhei-Everything Flows”: Change in hydrology and society-The IAHS Scientific Decade 2013-2022’, Hydrol. Sci. J., vol. 58, no. 6, pp. 1256–1275, 2013, doi: 10.1080/02626667.2013.809088.

[22] M. Salehi, ‘Global water shortage and potable water safety; Today’s concern and tomorrow’s crisis’, Environ. Int., vol. 158, 2022, doi: 10.1016/j.envint.2021.106936.

[23] ‘DSTU ISO 31000:2018 Menedzhment ryzykiv. Pryntsypy ta nastanovy (ISO 31000:2018, IDT)’. [DSTU ISO 31000:2018 Risk Management. Principles and recommendation]. DP «UkrNDNTs»,Nov. 29, 2018. Accessed: Sept. 28, 2025. [Online]. Available: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322 [in Ukrainian]

[24] ‘Upravlinnia ryzykamy vidpovidno do standartu ISO 31000:2018. Onlain-konsultant fakhivtsia z yakosti [Risk Management in Accordance with ISO 31000:2018. Online Consultation by a Quality Specialist]. Accessed: Oct. 01, 2025. [Online]. Available: https://qualityexpert.com.ua/articles/657421-upravlinnya-ryzykamy-vidpovidno-do-standartu-iso-310002018 [in Ukrainian]

[25] ‘DSTU EN 15975-2:2022 Bezpechnist postachannia pytnoi vody. Nastanovy shchodo upravlinnia ryzykamy ta kryzovymy sytuatsiiamy. Chastyna 2. Upravlinnia ryzykamy [DSTU EN 15975-2:2022 – Safety of Drinking Water Supply. Guidelines for Risk and Crisis Management. Part 2: Risk Management] (EN 15975-2:2013, IDT)’. Accessed: Oct. 02, 2025. [Online]. Available: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=108507 [in Ukrainian]

[26] ‘DSTU EN 15975-1:2022 Bezpechnist postachannia pytnoi vody. Nastanovy shchodo upravlinnia ryzykamy ta kryzovymy sytuatsiiamy. Chastyna 1. Upravlinnia kryzovymy sytuatsiiamy [DSTU EN 15975-1:2022 — Safety of Drinking Water Supply. Guidelines for Risk and Crisis Management. Part 1: Crisis Management.] (EN 15975-1:2011+A1:2015, IDT)’. Accessed: Oct. 02, 2025. [Online]. Available: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=108508 [in Ukrainian]

[27] Dr. Claudia Castell-Exner, ‘Security of drinking water supply – Guidelines for risk and crisis management EN 15975 – part 1 & 2’, presented at the Castell_Exner, 2016. Accessed: Oct. 02, 2025. [Online]. Available: https://erncip-project.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/wssw2016_Castell_Exner_EN%2015%20975_1_2_final.pdf

MCIT Modeling, control & information technologies

Optimization of Sprinkling Parameters for Improved Irrigation Quality

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.003

Svitlana Kozishkurt
Department of Water Engineering and Water Technologies
The National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
s.m.kozishkurt@nuwm.edu.ua

Vasyl Turcheniuk
Department of Water Engineering and Water Technologies
The National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
v.o.turchenuk@nuwm.edu.ua

Yuriy Zhylchuk
Department of Water Engineering and Water Technologies
The National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
zhylchuk_vg21@nuwm.edu.ua

Abstract—**Under conditions of water scarcity and climate change, it is crucial to align irrigation intensity with the soil's infiltration capacity. This study presents analytical modeling of the optimal sprinkling parameters (intensity and duration) taking into account the hydro-physical properties of soils, namely porosity and moisture content. Analytical equations were derived to determine the optimal irrigation duration that ensures efficient water use and prevents surface runoff formation. An example of calculations is provided for medium loamy soils under different sprinkling intensities.**

Keywords—irrigation; sprinkling; rainfall intensity; soil infiltration capacity; surface runoff; irrigation optimization.

I. INTRODUCTION

The rational use of water resources in irrigated agriculture is a key prerequisite for the sustainable development of Ukraine's agricultural sector. In the context of increasing water deficit, climate change, and soil degradation, optimizing irrigation parameters has become particularly relevant, especially considering the hydro-physical properties of soils and the hydrological conditions of the area.

Among the most widespread irrigation methods, sprinkling ensures uniform moisture distribution, the possibility of automation, and applicability to different soil types. The efficiency of this method largely depends on the structure of artificial rainfall—its intensity, droplet size, fall height, and wetting uniformity. Ignoring these parameters leads to surface runoff, soil structure destruction, decreased infiltration capacity, and irrigation-induced erosion [1, 2].

During sprinkling, water is delivered in the form of artificial rain that gradually transforms into soil moisture. The irrigation duration is determined by the irrigation application (or irrigation norm), which must restore the moisture level within the active soil layer. The sprinkler design, working pressure, and nozzle height determine the degree of jet atomization, and consequently, the average rainfall intensity.

Sprinkling intensity is a critical parameter directly influencing the rate of moisture delivery to the soil. Therefore, the quality of sprinkling depends on matching all characteristics of the artificial rainfall with the soil's hydro-physical properties—primarily its infiltration capacity.

Recent studies [3, 4] have demonstrated that both water application intensity and the kinetic energy of droplets significantly affect infiltration and erosion processes. When the critical energy flux threshold is exceeded, the soil structure becomes degraded, and water permeability decreases.

The main condition for efficient and environmentally safe sprinkling is ensuring that the artificial rainfall intensity corresponds to the soil's infiltration rate. To preserve soil structure, the recommended intensity values are 0.1–0.2 mm/min for heavy soils, 0.2–0.3 mm/min for medium soils, and 0.5–0.7 mm/min for light soils [5].

These recommendations are consistent with environmental safety standards, according to which irrigation with sprinkling machines exceeding an intensity of 0.3 mm/min is considered unacceptable [6]. However, the actual intensity of modern sprinkling machines used in southern regions often exceeds these values severalfold—for instance, the "Bauer Quadrostar" machine produces rainfall intensity up to 2.6 mm/min [1].

This significant discrepancy between technical capabilities and ecological requirements highlights the necessity of optimizing irrigation parameters and harmonizing them with the hydro-physical properties of soils.

The aim of this study is to develop an analytical model to determine the optimal sprinkling parameters that align with soil physical properties and ensure efficient water use without surface runoff formation.

II. Statement of the Problem

The research focuses on establishing relationships between sprinkling parameters and soil infiltration capacity. The main hypothesis is that for each soil type, there exists a range of irrigation intensities where the water application rate equals the infiltration rate.

The artificial rainfall intensity (ρ) was determined by

$$\rho=60\cdot Q/f, \text{ mm/min}, \quad (1)$$

where: Q – the water discharge, L/s; f – the effective irrigated area, m².

The maximum non-runoff irrigation application (m_{max}) was defined as

$$m_{max}=\rho\cdot t_p, \text{ mm}, \quad (2)$$

where: t_p – the irrigation duration until the appearance of puddles, min.

The infiltration rate (K) is described by [7]

$$K=K_1/t^{\alpha}, \text{ mm/min}, \quad (3)$$

where: K_1 – the infiltration rate one hour after irrigation begins; α – the attenuation exponent of the soil's infiltration capacity.

The infiltrated water layer (W) after irrigation time t is determined by

$$W=K_1\cdot t^{1-\alpha}/(1-\alpha), \text{ mm}. \quad (4)$$

In simplified form, the average infiltration rate for the first unit of time is

$$K_0=K_1/t^{1-\alpha}, \text{ mm/min}, \quad (5)$$

and the infiltrated water layer is

$$W=K_0\cdot t^{1-\alpha}, \text{ mm}. \quad (6)$$

For equilibrium between water application and infiltration, the following criterion applies

$$\rho\cdot t=K_0\cdot t^{1-\alpha}, \quad (7)$$

from which the optimal irrigation duration is derived

$$t_{opt}=(K_0/\rho)^{1/\alpha}, \text{ min}. \quad (8)$$

The parameters K_1 and α must be determined experimentally. For loamy soils of the Krasnoznamyanka irrigation system, the indices K_1 and α were found to depend on soil porosity, expressed as

$$K_1=8.2-0.12\cdot A, \text{ mm/min}, \quad (9)$$

where: A – the soil porosity, %.

The attenuation exponent α depends on the soil moisture content, varying from 0.8 near the wilting point to 0.3 at the field capacity. This relationship can be approximated as:

$$\alpha=0.3+0.5\cdot(\beta_{ex}-\beta_{wp})/(\beta_{fc}-\beta_{wp}) \quad (10)$$

where: β_{ex}, β_{wp}, β_{fc} – the initial moisture, wilting point, and field capacity, %, respectively.

The derived equations make it possible to incorporate soil physical properties into modeling irrigation intensity and duration, ensuring closer alignment between water application and its infiltration capacity. Figure 1 shows a graph for determining the maximum non-runoff irrigation application as a function of soil infiltration capacity.

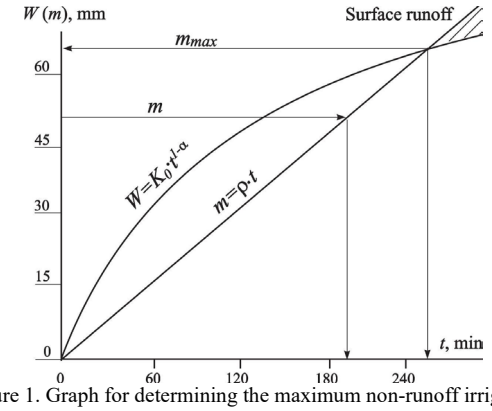


Figure 1. Graph for determining the maximum non-runoff irrigation application as a function of soil infiltration capacity

III. Solution of the Problem

Based on the proposed model, graphical dependencies between the applied water layer ($m=\rho\cdot t$) and the infiltrated moisture layer ($W=K_0\cdot t^{1-\alpha}$) were constructed.

Calculations were performed for medium loam with parameters K_1=2.8 mm/min and α=0.5 for three artificial rainfall intensities: ρ=0.1, 0.2 and 0.3 mm/min (Fig. 2).

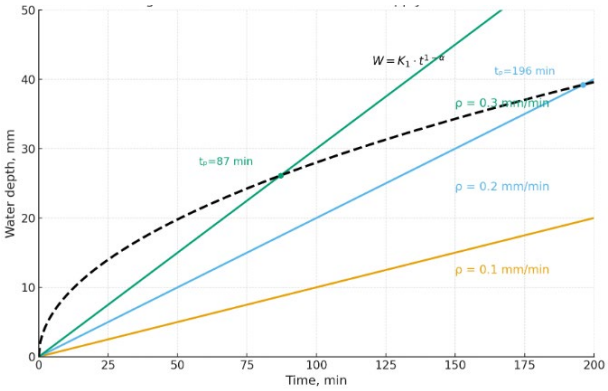


Figure 2. Relationship between the applied water layer and infiltrated moisture for medium loam (K_1 = 2.8 mm/min; α = 0.5)

The graph shows that as rainfall intensity increases, the time until surface runoff appears decreases, and the maximum irrigation application decreases accordingly.

The following surface runoff onset moments were obtained:

for ρ=0.1 mm/min – t_k=784 min, m_{max} = 78.4 mm;

for ρ=0.2 mm/min – t_k=196 min, m_{max} = 39.2 mm;

for ρ=0.3 mm/min – t_k=87 min, m_{max} = 26.1 mm.

These dependencies demonstrate that as rainfall intensity increases, the equilibrium between application and infiltration is reached faster—approximately inversely proportional to the square of intensity.

The obtained results can be used for selecting sprinkler machine parameters, configuring automatic irrigation systems, and developing environmentally safe water use regulations.

IV. CONCLUSION

1. An analytical model was developed to match artificial rainfall intensity with soil infiltration capacity, allowing determination of optimal irrigation duration and application considering soil hydro-physical properties.

2. It was established that optimal irrigation duration is governed by the relationship between water application intensity and soil parameters. Increasing rain intensity shortens irrigation duration but decreases infiltration efficiency.

3. For medium loamy soils, the following results were obtained:

at 0.3 mm/min: t = 87 min, m_{max} = 26.1 mm;

at 0.2 mm/min: t = 196 min, m_{max} = 39.2 mm;

at 0.1 mm/min: surface runoff was not observed at standard irrigation application/norms.

4. The proposed approach can be applied to: selecting operational modes of sprinkling machines; calculating parameters for automated irrigation systems with adaptive control; improving standards for environmentally safe water use.

5. The obtained results form the basis for further development of optimization systems for sprinkling regimes that account for climatic factors, soil type, and root-zone moisture content.

REFERENCES

[1] L. M. Bulaienko, Features of Sprinkling Use in the South of Ukraine. Kherson: Zroshuvane Zemlerobstvo. Collection of Scientific Works, vol. 61, pp. 88–90, 2014. [in Ukrainian: Л. М. Булаєнко, «Особливості використання дощування в умовах Півдня України» Зрошуване землеробство. Збірник наукових праць, Вип. 61, с. 88–90, 2014.] Available: http://izpr.ks.ua/archive/2014/61/32.pdf

[2] S. M. Kozishkurt and M. Ye. Kozishkurt, Advantages, Disadvantages and Ways to Improve Irrigation Efficiency. Rivne: Visnyk UDUVHP, vol. 1, no. 25, pp. 51–61, 2004. [in Ukrainian: С. М. Козішкурт, М. Є. Козішкурт, «Переваги, недоліки та шляхи підвищення ефективності дощування земель» Вісник УДУВГП, т. 1, № 25, с. 51–61, 2004.]

[3] L. Chen, Y. Wang, Z. Huang, and T. Liu, “Influence of raindrop impact angle on soil crust formation,” Agricultural Water Management, vol. 290, art. 108514, 2023.

[4] X. Zhang, R. Li, and H. Yang, “Critical factors affecting soil runoff and erosion under sprinkler irrigation,” Agricultural Water Management, vol. 287, art. 108299, 2023.

[5] Lower Dnipro Basin Water Resources Management, Basseinove upravlinnia vodnykh resursiv nyzhnoho Dnipra. [in Ukrainian: Басейнове управління водних ресурсів нижнього Дніпра.] Available: https://buvrnd.gov.ua/materialy-624.htm?ps=3

[6] Cabinet of Ministers of Ukraine, On Environmental Safety Standards for Irrigation and Drainage. Resolution No. 766, September 2, 2020. [in Ukrainian: Кабінет Міністрів України, «Про затвердження екологічних нормативів зрошення та осушення» Постанова № 766, 2 вересня 2020 р.]

[7] A. N. Kostyakov, Fundamentals of Melioration. Moscow: Selkhozizdat, 1960, pp. 85–87. [in Russian: А. Н. Костяков, Основы мелиорации. М.: Сельхозиздат, 1960, с. 85–87.]

MCIT Modeling, control & information technologies

Necessity and ways to improve the systems of irrigation management on a resource basis

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.004

Nataliia Prykhodko
Department of Water Engineering and
Water Technologies, NUWEE, Rivne, Ukraine
n.v.prihodko@nuwm.edu.ua

Anatoliy Rokochinskiy
Department of Water Engineering and
Water Technologies, NUWEE, Rivne, Ukraine
a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua

Pavlo Volk
Department of Water Engineering and
Water Technologies, NUWEE, Rivne, Ukraine
p.p.volk@nuwm.edu.ua

Abstract – **The necessity and ways of improving irrigation management systems are considered. An analysis of international and native experience in the development and implementation of information systems to support management decision-making in irrigation has been carried out. The current changes in conditions and requirements to irrigated agricultural production are described. Primarily in terms of the critical shortage and increasing cost of water and energy resources, which necessitate the improvement of existing methods and means of water use planning for irrigation on a resource basis. Appropriate resource-based solutions are proposed.**

Keywords — improvement, planned water use, irrigation, resource optimization.

I. INTRODUCTION

The situation in irrigated agriculture and its further development are influenced by existing global and local challenges and threats that are emerging in Ukraine's water and agricultural sectors, playing a significant role in the development of land reclamation science and practice. These challenges are caused by changes in the natural and socio-economic environment: climate change, water and energy crises, changes in water and land use conditions, reforms in public administration and individual sectors of the economy, scientific and innovative development, as well as, undoubtedly, Russian military aggression. [1; 3 etc.].

The continuous increase in the cost of material and technical resources involved in irrigation, as well as the need to involve investments in the restoration of irrigation systems, have led to higher requirements for the management of technological processes in irrigated agriculture.

As a result, it became necessary to move from planning and decision-making in irrigation using traditional approaches to planning and decision-making based on a significantly larger amount of information using information systems and taking into account not only the assessment of the effectiveness of the technological decisions made, but also the actual operating conditions of the facility, the level and direction of agricultural production, and, above all, the amount of resources spent to ensure it.

The need for further development and improvement of the principles, models, methods and means of water use planning in irrigation is due to the ever-increasing requirements for the quality and efficiency of its implementation in view of the necessity to increase the overall efficiency of water resources use by optimizing management processes, expanding information support, improving the efficiency, quality and overall level of technical operation of water resources [2; 3; 4, etc.].

Experience in developing and implementing information systems to support management decision-making in irrigation shows that the main trends in their development are the provision of services via the Internet and mobile applications, and the development of web database interfaces in the form of Internet portals. Examples of this type of information system to support management decision-making include: IRRINET and IrriSat (Italy), IrriSatSMS (Australia), Anglia River Basin (United Kingdom), IRRISA (France), etc.

At the same time, information systems for supporting management decisions are distinguished, which analyze remote sensing data, use modelling of processes in the 'soil-plant-atmosphere' environment, based on the processing of direct measurements of meteorological conditions, plant development parameters and soil moisture using various types of sensors, automated weather stations and devices [2, 5 etc.]. Such systems have their advantages and disadvantages in terms of achieving high productivity in the use of water and energy resources and do not always meet modern conditions and requirements for the implementation of such tasks.

II. STATEMENT OF THE PROBLEM

Modern processes of reform and innovative development in irrigation management are shaping new requirements and opportunities for the development of irrigation management methods. Flexible systemic approaches are needed that take into account the conditions of actual production, spatial and temporal

variability of natural and economic factors, as well as the ongoing transformation processes in irrigation system management.

In recent years, irrigated agriculture in Ukraine has faced significant changes in conditions and realities of its implementation – the increase in air temperature and overall climate aridity predicted in the context of climate change (which are already being actively observed and felt today) are leading to an increase in the frequency and intensity of droughts, a critical reduction in the natural moisture provision of territories and soil moisture content, an increase in total evaporation and the overall water demand of agricultural crops. All this takes place against a backdrop of growing scarcity and rising costs of water and energy resources that are available and suitable for irrigation. In addition, we are facing military aggression, which has led to a significant reduction in cultivated areas, exacerbated the critical problem of water scarcity, and restricted access to and the ability to collect information, including remote sensing data, which forms the basis of most modern information systems.

Recent changes in the operating conditions of irrigation systems necessitate changes in the methodological approaches to their creation and operation, which should be based on a resource-oriented approach, primarily with regard to the strategic importance of saving water and energy resources. This determines the need for further development of irrigation based on nature-based and environmentally efficient solutions through the development of regime-technological and technical resource-saving measures and means, taking into account the entire set of variable natural, agricultural and meliorative conditions.

It is necessary to further develop and improve existing principles, methods, models and means of irrigation management, which are driven by ever-increasing demands for quality and efficiency in terms of optimizing management processes, expanding information support, improving operational efficiency, quality and the overall level of irrigation system operation.

III.SOLUTION TO THE PROBLEM

To further development of existing approaches and solutions for operational irrigation planning information systems, as well as the currently developed principles for automating planned water management of drained lands [1; 4], we propose a ***complex automated planned water use system (CAPWS)***. In contrast to existing solutions, ***CAPWS*** offers the possibility for existing irrigation systems to consider planned management in a comprehensive and interconnected manner by developing long-term ***water use plans (WUP)*** for the technological preparation stage for the next season (strategic planning level) and operational management by correcting ***WUP*** in real-time based on short-term forecasts (tactical planning level) using ***information systems for operational water use planning (IS OWUP)***.

At the same time, in line with our previous research on the justification of optimal solutions in the design, reconstruction and operation of irrigation systems as complex natural-technical, ecological and economic systems, a resource-based approach can be implemented using a comprehensive optimization model [6; 7]

$$\begin{cases} U_0 = \underset{\{i\}}{extr}\, U_i, i = \overline{1, n_i}; \\ R_{0j} = \min\limits_{\{i\}} \left| R_{ji} - \hat{R}_j \right|, j = \overline{1, n_j}; i = \overline{1, n_i}, \end{cases} \quad (1)$$

where U_o – extreme value under the accepted condition of the selected criterion of economic optimality U, which corresponds to the optimal technical and technological solution based on a set of possible options $I = \{i\}$, $i = \overline{1, n_i}$; R_{ji} – a set $\{j\}$, $j = \overline{1, n_j}$ of criteria for the use of resources for the relevant technical and technological solutions; $\hat{R}_j$ – relevant justified indicators of the level of use of this resource.

The system of equations in a general implicit form allows, on the basis of resource optimization, to theoretically justify the possibility of setting the task, search for and determine sequentially optimal operational, technological and technical solutions for diverse components and the system as a whole in their interconnection, both at the empirical and empirical-functional levels of determining the relationship between them.

This combination makes it possible to improve the efficiency of water use management in irrigation by improving the assessment of various types of resource capabilities of water and land users in each individual case, primarily the limited availability and suitability of water resources for irrigation.

CONCLUSIONS

Changes in the operating conditions of irrigation systems and agricultural production in general require improvement of approaches to water use planning and the creation of effective water management strategies in irrigation.

It is necessary to further develop and improve existing principles, methods, models and means of implementing water use planning in irrigation, which are driven by growing demands for quality and efficiency in its implementation in terms of optimizing management processes, improving the efficiency, quality and overall level of operation of irrigation systems, and expanding information support.

The improved ***complex automated planned water use system*** in irrigation has been proposed. This system makes it possible to consider planned and operational water resource management in a comprehensive and interrelated manner. It is based on the development of long-term ***water use plans*** at the stage of technological preparation of the system for the next season across the entire spectrum of variable natural, agricultural and meliorative conditions and their subsequent adjustment in real-time conditions based on short-term forecasts using ***information systems for operational water use planning***.

The availability of such a tool makes it possible to improve the effectiveness of management decisions on

irrigation by improving the assessment of various types of resource capabilities of water users in each individual case, primarily with regard to the growing shortage and cost of water and energy resources, which corresponds to modern conditions and requirements for irrigated agriculture.

REFERENCES

[1] Water management in Ukraine: problems and innovations in development. (2018). Monograph. Ed. L.F. Kozhushko, V.A. Strashuk, M.A. Khvesyk, A.M. Rokochinskiy. Rivne [in Ukrainian].

[2] Zhovtonog, O. I., Polishchuk, V. V., Filipenko, L. A., Saliuk, A. F., Butenko, Y. O., & Hoffmann, M. W. (2019). Operational irrigation management: Modern challenges, realities and visions. *Land Reclamation and Water Management*, (2), 55-67.

[3] Romaschenko, M.I., Kovalchuk, V.P., Tarariko, Y.O., Soroka, Y.V., Krucheniuk, A.V., & Demchuk, O.S. (2016). Information management system for agricultural production on the Internet. *Land Reclamation and Water Management*, *104*(2), 87-92.

[4] Rokochinskiy, A.M. (2010). The scientific and practical aspects optimization of water regulation drained lands on environmental and economic grounds. Monograph. Ed. M.I. Romashchenko. Rivne: NUVGP. ISBN 978-966-327-141-5 [in Ukrainian].

[5] «Information System for Operational Irrigation Planning IS GIS Poliv», authors: O.I., Zhovtonog, L.A., Filipenko, et al. (Certificate of registration No. 54650 dated 07.05.2014).

[6] Prykhodko, N., Rokochinskiy, A., Volk, P., Kuzmych, L., Koptyuk, R., Frolenkova, N., Volk, L., Tykhenko, R. & Openko, I. (2025). Resource and Ecological Principles of Irrigation in Current Conditions. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 72*(1), 2025. 15-27. https://doi.org/10.2478/heem-2025-0002

[7] Stashuk V., Rokochynskyi A., Prykhodko N., Volk P., Koptiuk R., Frolenkova N., Volk L. Reducing of Water and Energy Resources Consumption in Irrigation Based on Resource Optimisation. *Land Reclamation and Water Management*, 2024, (1), pp. 31–41. https://doi.org/10.31073/mivg202401-387

MCIT Modeling, control & information technologies

Modeling and Management of Rice Water Consumption in the Danube Delta

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.005

Vasyl Turcheniuk
Department of Water Engineering and Water Technologies
The National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
v.o.turchenuk@nuwm.edu.ua

Svitlana Kozishkurt
Department of Water Engineering and Water Technologies
The National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
s.m.kozishkurt@nuwm.edu.ua

Nazarii Voitsekhovych
Department of Water Engineering and Water Technologies
The National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
n.v.vojtsekhovych@nuwm.edu.ua

***Abstract* – The article investigates the total water consumption of rice in the Danube Delta over six growing seasons. The study established that the average water use amounts to 9,273 m³/ha, of which more than 50% is attributed to transpiration. A comparative analysis of the Alpatyev, Blaney–Criddle, and Hargreaves methods was carried out. The Alpatyev method proved to be the most accurate (error ±1.6%), while the Blaney–Criddle method is suitable for integral assessments, and the Hargreaves method is applicable only for preliminary calculations. The obtained results can be used to optimize irrigation regimes in rice systems of southern Ukraine.**

Keywords – rice; total water consumption; evapotranspiration; water consumption coefficient; Alpatyev method; Blaney–Criddle method; Hargreaves method; Danube Delta.

I. Introduction

Rice is one of the world's leading food crops, providing nourishment for nearly half of the global population. In 1961, rice was cultivated on 115 million hectares worldwide. By 2020, the cultivation area had increased to 161 million hectares (over 40% growth) [1]. However, despite its global significance, rice is also the single largest consumer of freshwater resources. More than 75% of rice is grown under flooded conditions.

In Ukraine, rice cultivation, particularly in the southern regions and the Danube Delta, plays an important role in ensuring food security. At the same time, this sector is critically dependent on irrigation and is characterized by an exceptionally high level of water use. The efficiency of water resources management is a key prerequisite for the sustainable functioning of rice agroecosystems [2]. This issue becomes especially relevant in the context of climate change and the growing scarcity of freshwater [3; 4].

Given the substantial water requirements and limited availability of resources, it is necessary to achieve water savings at all stages of rice irrigation systems. Previous research has shown significant potential for reducing water and energy consumption in rice cultivation, as well as for improving production efficiency. For this purpose, determining water consumption norms, which include both evaporation from the soil or water surface and plant transpiration, is essential. Accurate determination of these values, and thus of total water consumption, forms the basis for establishing optimal irrigation regimes, setting water supply norms, and developing water management measures.

In scientific practice, a wide range of methods are applied to estimate evapotranspiration – from simple empirical formulas (Blaney–Criddle, Hargreaves) [5; 6], which require only minimal meteorological data, to complex equations (Penman–Monteith), which account for both energy and aerodynamic balance and are recognized as the international standard [7–9]. In addition, bioclimatic approaches are used, such as the Alpatyev method, which is based on air humidity deficit and water consumption coefficients [10]. However, the effectiveness of these methods strongly depends on regional conditions and requires further investigation.

II. Statement of the Problem

The current development of rice cultivation in Ukraine is taking place under conditions of freshwater scarcity, climate variability, and increasing environmental challenges. The Danube Delta is characterized by complex hydrogeological and hydrological conditions: shallow groundwater levels, dependence on the river's flood regime, seasonal unevenness of moisture supply, and high sensitivity to fluctuations in air temperature and humidity [3; 4].

Under such circumstances, the accurate determination of total rice water consumption becomes critically important, as it directly affects the efficiency of

irrigation systems and the rational use of regional water resources [3; 4].

The aim of this study is to analyze existing approaches to determining rice water consumption norms, taking into account freshwater shortages and climate change. Thus, the urgent task is to select the most reliable and, at the same time, practically applicable method for estimating total rice water consumption under the conditions of the Danube Delta. Solving this problem will improve agricultural production efficiency, reduce environmental pressure, and ensure the stability of rice reclamation systems even under crisis conditions.

III. Solution of the Problem

The research was conducted in the central part of the Danube Delta over six growing seasons. During the experiments, the values of total rice water consumption, its components (evaporation and transpiration), as well as water consumption coefficients were determined.

The total water consumption of rice was determined using evaporimeter vessels according to the method of V.B. Zaitsev and in accordance with modern methodological recommendations [11-13]. It is equal to the value of the irrigation norm for rice and is calculated on the basis of the water balance using the formula of V.B. Zaitsev [12]:

$$M_n=(E_o+T_o-P-K)+(W+F_v+F_o)+(S_r+S_u+S_o)$$

$$M_n = (E_o + T_o - P - K) + (W + F_v + F_o) + (S_r + S_u + S_o), \quad (1)$$

where: M_n – irrigation norm for rice, mm; E_o – evaporation from the water surface of the rice field, mm; T_o – transpiration, mm; P – precipitation, mm; K – rainfall utilization coefficient accounting for condensation (dimensionless); W – soil saturation, mm; F_v – vertical filtration, mm; F_o – horizontal runoff (lateral filtration), mm; S_r – water exchange (circulation) according to the irrigation regime, mm; S_u – unplanned water discharges, mm; S_o – water discharge at the end of the rice growing season, mm.

To compare the experimental data, the effectiveness of theoretical methods for determining total water consumption – Alpatyev, Blaney–Criddle, and Hargreaves – was evaluated in order to establish the most reliable and practically applicable approach for the conditions of the Danube Delta.

The study established that the average total rice water consumption is 9,273 m³/ha per growing season, ranging from 8,994 to 9,468 m³/ha. The values of transpiration and evaporation were determined for different growth stages. At the initial stage (emergence–tillering), evaporation prevailed in the water balance structure (120–140 mm). Later, with an increase in leaf surface area, transpiration intensified, and in the stem elongation–panicle initiation phase it exceeded evaporation by 43–48%. Overall, the share of transpiration in total water consumption ranged from 50.6% to 56.6%, whereas evaporation dominated during the early growth stages.

The water consumption coefficient, which characterizes the irrigation water expenditure per unit of yield, ranged from 188 to 216 m³/100 kg, averaging 200.6 m³/100 kg.

The analysis of experimental results revealed a strong correlation between water consumption and regional climatic parameters. In particular, a high correlation was found between total water consumption and air humidity deficit (r = 0.85), as well as between total water consumption and radiation balance (r = 0.96). These relationships allow for more accurate determination of irrigation norms, hydromodules, and water supply requirements in designed systems, as well as improvements in planned water use on existing systems in the southern Danube region.

The analysis of theoretical methods for determining rice water consumption in the Danube Delta showed the following:

- The Blaney–Criddle method is based on mean monthly air temperature and relative day length; however, it does not always adequately reflect regional conditions [5];

- The Hargreaves method relies on temperature amplitude and radiation balance and is mainly applied for preliminary calculations or in the absence of meteorological data. Although widely used internationally, it yields significant errors under Danube Delta conditions, as it does not account for air humidity deficit and flooding specifics [6];

- The Alpatyev method, based on a bioclimatic approach, accounts for air humidity deficit and the agrobiological characteristics of rice, making it better adapted to the conditions of the Danube Delta [10];

- The Penman–Monteith method, regarded as the international standard for determining reference evapotranspiration, could not be applied due to the absence of necessary meteorological data [7–9]. Its application requires a complete dataset, including wind speed at 2 m height, daily solar radiation, saturation deficit, and psychrometric parameters. On the experimental plots of the Danube Delta, such information was not systematically collected, which made the use of this method impossible.

A comparative analysis of the methods revealed substantial differences in their accuracy and practical applicability (Fig. 1).

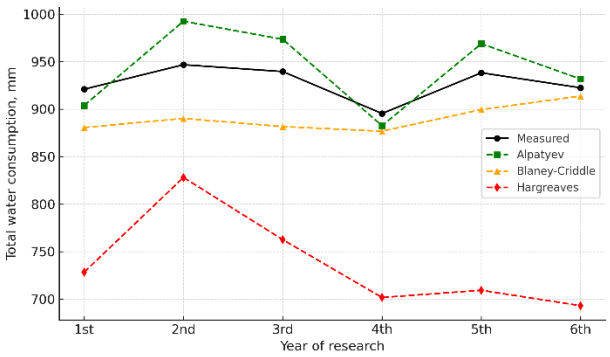


Figure 1. Comparison of measured and calculated values of total rice water consumption in the Danube Delta (six growing seasons)

The Alpatyev method proved to be the most reliable, providing the smallest deviation from actual data (±1.6%) and adequately accounting for both the regional climatic conditions and the biological characteristics of

the crop. The Blaney–Criddle formula demonstrated satisfactory accuracy only at the level of integral estimates for the entire growing season (average deviation about 4%), whereas the Hargreaves method showed the largest errors (approximately 20%), which limits its application to preliminary calculations only.

Thus, under production conditions in the Danube Delta, the Alpatyev method is the most appropriate for use. The empirical formulas of Blaney–Criddle and Hargreaves may serve as auxiliary tools, while the heat balance method should be applied as a control reference.

IV. CONCLUSION

1. The average total rice water consumption in the Danube Delta amounts to 9,273 m³/ha, of which more than half is attributed to transpiration.

2. A strong correlation was established between water consumption and air humidity deficit (r = 0.85) as well as radiation balance (r = 0.96), which allows for more accurate determination of irrigation norms.

3. The most reliable method was found to be the Alpatyev method (error ±1.6%), while the Blaney–Criddle formula is suitable for integral assessments (≈4%), and the Hargreaves method shows significant errors (up to 20%).

4. For the conditions of the Danube Delta, it is recommended to use the Alpatyev method as the main approach, while the Blaney–Criddle and Hargreaves methods may serve as auxiliary tools.

REFERENCES

[1] A. N. M. R. B. Rahman and J. Zhang, “Trends in rice research: 2030 and beyond,” *Food and Energy Security*, vol. 12, no. 2, e390, 2022. doi: 10.1002/fes3.390

[2] A. Nawaz, A. U. Rehman, A. Rehman, S. Ahmad, K. H. M. Siddique, and M. Farooq, “Enhancing the resilience of rice production systems: A review of potential strategies and future perspectives,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 320, 103400, 2021. doi: 10.1016/j.jcs.2021.103400

[3] V. A. Stashuk and R. A. Vozhehova, Eds., Improving the efficiency of rice irrigation systems in Ukraine: Scientific and methodological recommendations, 2nd ed. Kyiv–Kherson–Rivne: NUWEE, 2020. [in Ukrainian: В. А. Сташук, Р. А. Вожегова (ред.), Підвищення ефективності функціонування рисових зрошувальних систем України: науково-методичні рекомендації, 2-ге вид., перероб. та доп. Київ–Херсон–Рівне: НУВГП, 2020].

[4] V. A. Stashuk, A. M. Rokochynskyi, V. O. Turcheniuk, et al., Improving the efficiency of Danube rice irrigation systems: Scientific and methodological recommendations. Odesa–Rivne: NUWEE, 2018. [in Ukrainian: В. А. Сташук, А. М. Рокочинський, В. О. Турченюк та ін., Підвищення ефективності функціонування Придунайських рисових зрошувальних систем: науково-методичні рекомендації. Одеса–Рівне: НУВГП, 2018].

[5] FAO, Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs (Irrigation and Drainage Paper No. 24). Rome: FAO, 1977.

[6] M. Hafeez, Z. A. Chatha, A. A. Khan, A. B. Gulshan, A. Basit, and F. Tahira, “Comparative analysis of reference evapotranspiration by Hargreaves and Blaney–Criddle equations in semi-arid climatic conditions,” *Current Research in Agricultural Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 52–57, 2020.

[7] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO, 1998. http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm

[8] A. P. Shatkovskyi, M. I. Romashchenko, V. V. Vasyuta, et al., “Evaluation of the Penman–Monteith model for determination of soybean evapotranspiration in irrigated conditions of the Steppe of Ukraine,” *Modern Phytomorphology*, vol. 14, pp. 111–113, 2020. doi: 10.5281/zenodo.4449887

[9] M. Romashchenko, A. Shatkowski, and O. Zhuravlev, “Features of application of the Penman–Monteith method for conditions of drip irrigation in the Steppe of Ukraine (on the example of grain corn),” Journal of Water and Land Development, vol. 31, pp. 123–127, 2016.

[10] S. M. Alpatyev, Irrigation and drainage of lands. Kyiv: Urozhai, 1971. [in Ukrainian: С. М. Алпатьєв, Зрошення і осушення земель. Київ: Урожай, 1971].

[11] WMO, Evaporation, evapotranspiration and soil moisture. The Guide to Hydrological Practices, vol. I. WMO No. 168. Geneva: World Meteorological Organization, 2008.

[12] V. B. Zaitsev, Rice irrigation system. Moscow: Kolos, 1964. [in Russian: В. Б. Зайцев, Рисовая оросительная система. Москва: Колос, 1964].

[13] DDAEU, Calculation of irrigation regimes of agricultural crops. Dnipro: DDAEU, 2023. [in Ukrainian: ДДАЕУ, Розрахунок режимів зрошення сільськогосподарських культур. Дніпро: ДДАЕУ, 2023].

MCIT
Modeling, control & information technologies

Екологічна оцінка впливу антропогенних екополютантів на гідробіонтів річки Сула

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.006

Тетяна Басюк
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
t.o.basyuk@nuwm.edu.ua

Вадим Онуфрійчук
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
onufriichuk_vg24@nuwm.edu.ua

Іванна Сисонюк
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
sysoniuk_ak24@nuwm.edu.ua

Анотація — **У статті проаналізовано вплив антропогенних екополютантів на гідроекосистему річки Сула. На основі багаторічних даних гідрохімічного моніторингу та біологічних досліджень оцінено сучасний стан забруднення водойми. Вивчено динаміку основних забруднюючих речовин, проаналізовано видове різноманіття гідробіонтів як біоіндикаторів стану екосистеми. Встановлено, що основним джерелом забруднення є промислові та сільськогосподарські стоки, що призводить до структурних змін у угрупованнях зообентосу та іхтіофауни. Запропоновано комплексні заходи щодо зменшення надходження забруднювачів, включаючи вдосконалення очищення стічних вод, впровадження сучасної системи екологічного моніторингу та адаптацію екологічно чистих технологій у промисловості та сільському господарстві.**

Ключові слова — річка, гідробіонти, антропогенне забруднення, гідрохімічний стан, біоіндикація, охорона водних екосистем.

I. Вступ

Проблема антропогенного забруднення водних екосистем набуває все більшого загострення в умовах інтенсифікації господарської діяльності та зростання навантаження на водні ресурси. Річки, як основні артерії прісноводних екосистем, зазнають значного трансформаційного впливу, що призводить до погіршення якості води, зменшення біорізноманіття та порушення екологічної рівноваги [7; 8; 12; 16; 17].

У контексті України, де майже 70% поверхневих водних ресурсів характеризуються як забруднені, дослідження регіональних річкових систем набуває особливої важливості. Річка Сула, будучи лівою притокою Дніпра, відіграє ключову роль у формуванні гідрологічного режиму та підтримці біорізноманіття Лівобережного Лісостепу. Проте, інтенсифікація сільськогосподарського виробництва, промислове забруднення та комунальні стоки створюють серйозну загрозу для екологічного стану цієї водної артерії [1; 3; 4; 9].

Крім того, актуальність роботи зумовлена необхідністю виконання вимог Водної рамкової директиви ЄС, Водного кодексу України та забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів в умовах євроінтеграційних процесів.

Отже, проведення комплексної екологічної оцінки впливу антропогенних екополютантів на гідробіонтів річки Сула та розробка на її основі ефективних заходів щодо зменшення забруднення є надзвичайно актуальним завданням, що має як наукове, так і практичне значення для забезпечення сталого розвитку регіону та збереження його екологічного потенціалу.

II. Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводилися на основі даних гідрохімічного моніторингу з 1991 по 2023 роки, отриманих з п'яти гідрологічних постів, розташованих на річках Сула (м. Лубни), Ромен (м. Ромни) та Удай (м. Прилуки) (рис. 1, табл. 1).

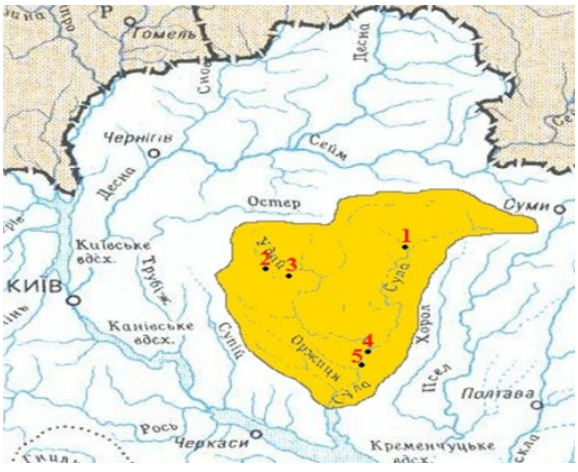


Рис. 1. Гідрологічні пости у межах басейну р. Сула

Таблиця 1. Розташування гідрологічних постів у межах басейну р.Сула

№ з/п	Річка	Населений пункт	Розташування
1	р. Ромен	м. Ромни	0.1 км нижче автодорожнього мосту, в межах населеного пункту
2	р. Удай	м. Прилуки	0.8 км вище міста, у створі водопосту
3	Р. Удай	м. Прилуки	1 км нижче міста, 0.8 км нижче місця скиду стічних вод ПАТ «Чернігівнафтогаз»
4	Р. Сула	м. Лубни	0.5 км вище міста, 1.3 км вище місця скиду стічних вод м'ясокомбінату
5	Р. Сула	м. Лубни	0.2 км нижче міста, 4.2 км нижче місця скиду стічних вод м'ясокомбінату

Використовувалися стандартні методи аналізу фізико-хімічних показників води, включаючи визначення головних іонів (*HCO_3, SO_4, Cl, Ca, Mg, Na, K*), біогенних елементів (*NH_4, NO_2, NO_3,* загальний фосфор), органічних речовин (*$БСК_5$*, біхроматна окиснюваність) та важких металів (*Fe, Cu, Mn, Cr, Zn*) [2; 11; 14].

Біологічні дослідження включали аналіз видового складу зоопланктону, зообентосу та іхтіофауни. Відбір проб здійснювався стандартними гідробіологічними методами з подальшою видовою ідентифікацією в лабораторних умовах.

III. Основні результати дослідження

Річка Сула, як важлива складова басейну Дніпра, відіграє ключову роль у забезпеченні водними ресурсами та підтримці біорізноманіття регіонів Сумської, Чернігівської, Полтавської та Київської областей. Протяжність річки становить 363 км, площа басейну – 18 500 км². Інтенсифікація антропогенної діяльності останніх десятиліть призводить до значного забруднення річки, що загрожує її екологічному стану та біологічному різноманіттю [5; 6; 12; 15; 16].

Аналіз багаторічних даних виявив значні зміни у гідрохімічному режимі річки. Виявлено позитивні тенденції у зниженні концентрацій амонійного азоту (NH_4) та загального фосфору після 2010 року. Концентрація амонійного азоту знизилася з 0,36 мг/дм³ у 2008 році до майже нульових значень у 2023 році (рис. 2) [10].

Однак спостерігається підвищення рівня нітратів (NO_3) у період 2008-2012 років, що пов'язано з інтенсифікацією сільськогосподарської діяльності в басейні річки. Максимальні концентрації нітратів досягали 1,36 мг/дм³ (рис. 3) [10].

Значне зниження концентрацій завислих речовин та біхроматної окиснюваності свідчить про ефективність природоохоронних заходів, реалізованих у регіоні. Загальна мінералізація води коливається від 659 мг/дм³ під час весняної повені до 871 мг/дм³ у зимову межень [10].

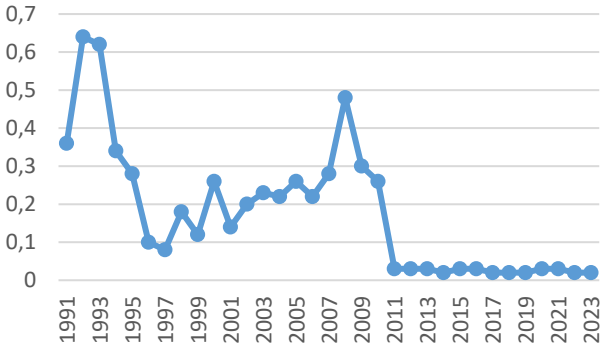


Рис. 2. Середньорічна концентрація сольового амонію (NH4) у воді р. Сула – м. Лубни, 0,2 км нижче міста, мг/дм³

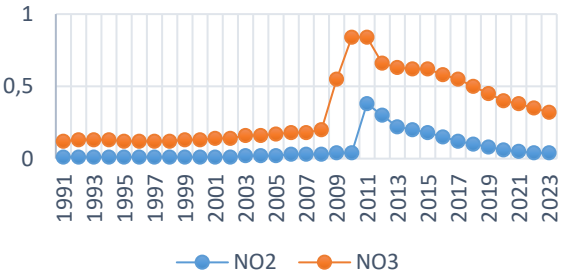


Рис. 3 – Середньорічна концентрація нітратних і нітритних іонів у воді р. Сула – м. Лубни, 0,2 км нижче міста, мг/дм³

Дослідження зообентосу виявило переважання толерантних до забруднення видів. Хірономіди складають 45,1% від загальної кількості комах у зообентосі, що свідчить про органічне забруднення водойми. Олігохети, особливо представники родини Tubificidae, також демонструють високу чисельність на мулистих донних відкладеннях (рис. 4).

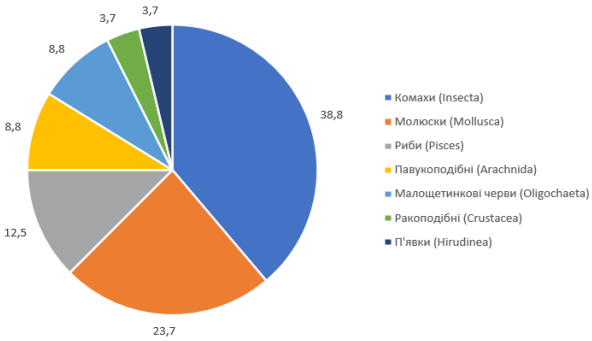


Рис. 4.Таксономічний склад зообентосу р. Сула

Частка чутливих до забруднення груп, таких як одноденки (6,5%) та волохокрилі (12,9%), є відносно низькою, що підтверджує наявність антропогенного навантаження на екосистему річки (рис. 5).

Іхтіофауна річки представлена переважно еврибіонтними видами, зокрема карасем сріблястим (Carassius gibelio), пліткою (Rutilus rutilus), лящем (Abramis brama) та окунем (Perca fluviatilis). Зменшення чисельності чутливих видів риб свідчить про погіршення якості води.

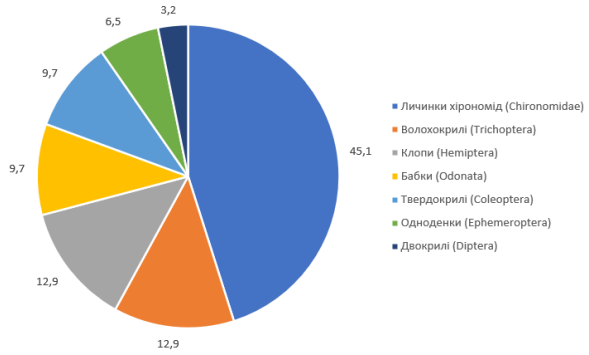


Рис. 5. Співвідношення рядів комах у складі зообентосу р. Сула

Основними джерелами екополютантів є металургійні, хімічні, машинобудівні промислові підприємства, які розташовані в містах Лубни, Ромни та Прилуки. Значний внесок у забруднення вносить сільськогосподарська діяльність - стоки з полів, що містять нітрати, фосфати та пестициди.

Комунальні стоки з населених пунктів також є важливим джерелом органічного забруднення. За останні два десятиліття спостерігається тенденція до зниження обсягів забору води та скидів стічних вод, що пов'язано зі зменшенням промислового виробництва в регіоні.

На основі отриманих результатів запропоновано комплекс заходів щодо покращення стану річки Сула (табл. 2) [13].

Таблиця 2 – Заходи щодо покращення стану річки Сула

№ з/п	Категорія заходів	Комплекс заходів
1	Техно-логічні	впровадження сучасних методів очищення стічних вод (мембранні технології, біофільтрація)
		використання замкнутих циклів водопостачання на промислових підприємствах
		застосування екологічно чистих методів обробки ґрунту в сільському господарстві
2	Органі-заційні	створення комплексної системи моніторингу з автоматизованими пунктами спостереження
		посилення контролю за дотриманням екологічних норм
		впровадження економічних механізмів стимулювання екологічно чистих технологій
3	Еколо-гічні	відновлення прибережних захисних смуг
		ревіталізація заплавних територій
		створення штучних водно-болотних угідь для доочищення стічних вод

IV. ВИСНОВКИ

Забруднення річки Сула екополютантами антропогенного походження призводить до структурних змін у гідробіоценозах, що проявляється у збільшенні частки толерантних видів (хірономіди, олігохети) та зменшенні чисельності чутливих груп гідробіонтів. Гідрохімічний моніторинг виявив позитивні тенденції у зниженні концентрацій амонійного азоту та загального фосфору після 2010 року, що свідчить про ефективність реалізованих природоохоронних заходів.

Ефективними заходами зменшення надходження забруднювачів є: впровадження сучасних методів очищення стічних вод; перехід до екологічно чистих технологій у промисловості та сільському господарстві; створення комплексної системи моніторингу та посилення контролю за дотриманням екологічних норм. Для відновлення екосистеми річки необхідно здійснювати заходи з ревіталізації заплавних територій та активно залучати громадськість до охорони водних ресурсів.

Література

[1] Вишневський В.І. Гідрологічні характеристики річок України. К.: Ніка-Центр, 2007. 324 с.
[2] Горєв Л.М., Пелешенко В.І., Хільчевский В.К. Гідрохімія України: Підручник. - К.:Вища школа, 1995. 307 с.
[3] Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). К.: Нікацентр, 2010. 316 с.
[4] Даус М.Є., Кликач Н.В. Екологічна оцінка якості води у басейні річки Сула. Вісник гідрометцентру Чорного і Азовського морів, 2018. №1(21). С.137-143.
[5] Екологічний паспорт Сумської області (2008-2023р.р.) Режим доступу : http://www.menr.gov.ua/protection/protection1/sumska
[6] Каталог річок і водойм України : Навч.-довідк. посіб. / Г. І. Швебс, М. І. Ігошин; Одес. нац. ун-т ім. І.І.Мечникова. - О. : Астропринт, 2003. 392 с.
[7] Кирилюк О. В. Оцінка перетвореності малих річкових басейнів як крок до визначення антропогенних змін гідроморфологічних умов. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2010. Т. 18. С. 283-289.
[8] Ковальчук І.П., Курганевич Л.П. Гідроекологічний моніторинг: Навчальний посібник. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2009. 254 с.
[9] Лобода Н. С., Сербова З. Ф., Божок Ю. В. Вплив змін клімату на водні ресурси України у сучасних та майбутніх умовах (за сценарієм глобального потепління А1В). Український гідрометеорологічний журнал. 2014. № 15. С. 149-159.
[10] Офіційний сайт Державного агентства водних ресурсів України. Режим доступу: https://www.davr.gov.ua/
[11] Романенко В.Д. Основи гідроекології. К.: Обереги, 2001. 728 с.
[12] Тімченко В.М. Екологічна гідрологія водойм України: Монографія. / К.: Наук. думка, 2006. 384 с. 10. Сафранов Т.А. Екологічні основи природокористування: Навчальний посібник. / Львів: Новий світ – 2000, 2003. 248 с.
[13] Хільчевський В. К., Забокрицька М. Р., Кравчинський Р. Л., Чунарьов О. В. Основні засади управління якістю водних ресурсів та їхня охорона : навч. посібник. К., 2015. 172 с.
[14] Хільчевський В.К. та ін. Гідрохімія річок Лівобережного Лісостепу України. К.: Ніка-Центр, 2014. 240 с.
[15] Швебс Г.І., Ігошин М.І. Каталог річок і водойм України: Навчально-довідковий посібник / За ред. Є.Д. Гопченка. / Одеса: Астропринт, 2003. 392 с.
[16] Шевчук С. А. Водні ресурси України: екологічні аспекти. К, 2018. 288 с.
[17] Яцик А.В. Водогосподарська екологія. Київ: Генеза, 2004. 480 с.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Математична оцінка оптимальних конструктивних параметрів дренажних систем подвійної дії для різних ґрунтових умов України

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.007

Всеволод Богаєнко
Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАНУ,
Київ, Україна
sevab@ukr.net

Сергій Коломієць
Інститут водних проблем і меліорації НААН,
Київ, Україна

Михайло Ромащенко
Інститут водних проблем і меліорації НААН,
Київ, Україна

Анастасія Сардак
Інститут водних проблем і меліорації НААН,
Київ, Україна

Анотація — **У роботі розглядається задача математичного моделювання водорегулювання на дренажних системах подвійної дії з метою визначення конструктивних параметрів таких систем. Для проведення обчислювальних експериментів використовуються засоби, що базуються на рівнянні Річардса. Для отриманих в результаті лабораторного визначення даних щодо гідрофізичних властивостей ґрунтів, що дренуються, розв'язується задача визначення таких конструктивних параметрів системи дренажу – глибини закладання дрен та відстані між ними – за яких система забезпечує дренування поверхневого шару ґрунту та мінімізує необхідність застосування зрошення протягом сезону вегетації.**

Ключові слова — математичне моделювання; водорегулювання; дренажні системи подвійної дії; оптимізація параметрів

I. Вступ

Завдання підвищення ефективності водорегулювання є актуальним для значної частини території України, зокрема Полісся, де зосереджено 3.2 млн га дренажних систем різних типів. Ці системи, запроєктовані та побудовані до настання на відповідних територіях нинішньої «гарячої фази» змін клімату [1], мали вирішувати переважно задачу відведення надлишкової води у весняний період та створення достатньої ємності зони аерації для акумуляції опадів літнього періоду. Проте за нинішніх умов в зоні Українського Полісся починаючи з липня місяця спостерігається недостатній рівень природного вологозабезпечення. Це актуалізує питання здійснення заходів з реконструкції та модернізації наявних дренажних систем шляхом доповнення їх функцією водорегулювання протягом всього періоду вегетації.

Реалізація цієї функції забезпечується через можливість використання ґрунтових вод шляхом регулювання їх рівня, проведенням зрошення, або поєднанням цих двох варіантів. За цього, ефективність водорегулювання значною мірою залежить від застосованого інструментарію прийняття управлінських рішень.

Основним джерелом прогнозних даних для фізично обґрунтованої підтримки прийняття рішень при проєктуванні та експлуатації меліоративних систем є математичне моделювання вологоперенесення. Вихідними даними для моделювання є дані щодо гідрофізичних властивостей ґрунтів, бажано одержані лабораторно, та польові вимірювання поточного стану показників системи "ґрунт-рослина-атмосфера".

Найчастіше використовуваний клас моделей базується на варіаціях рівняння вологоперенесення Річардса. Методи розв'язання поставлених щодо таких моделей прямих задач варіюються від аналітичних [2] до повністю чисельних [3, 4].

Зауважимо, що системи прийняття рішень при управлінні та проєктуванні дренажних систем переважно роблять акцент або виключно на ефективності дренування, або на функції вологозабезпечення, та є, переважно, засобами сценарного моделювання [5]. У даній роботі, використовуючи та розвиваючи раніше розроблені авторами засоби математичного моделювання, зроблено фокус на знаходженні для конкретних ґрунтових умов таких конструктивних параметрів дренажних систем подвійної дії, за яких у різні періоди сезону вегетації забезпечується як необхідне дренування, так і забезпечення рослин вологою.

II. Методика математичного моделювання

У дослідженні використовується методика математичного моделювання вологоперенесення на дренажних системах подвійної дії, детально описана у [6].

Будемо розглядати задачу моделювання динаміки напорів у ґрунтовому масиві, водорегулювання на якому здійснюється системою подвійної дії, за наступних умов [6]:

◦ дренажні трубопроводи встановлені без ухилу і поєднують два канали;

◦ дрени вважаються постійно повністю заповненими водою;

◦ у обох каналах підтримується однаковий рівень води.

За великої відстані між каналами, фільтрацією з них можна знехтувати і, вважаючи однорідним розподіл вологи вздовж дрен, моделювання може проводитись у двовимірному наближенні розглядаючи розріз паралельно дренажним каналам, посередині між ними. Область моделювання за цього можна обмежити зоною впливу однієї дрени. Нижньою границею області моделювання є водотрив.

При моделюванні використовується рівняння Річардса у термінах напорів, що враховує перехід стану ґрунту з ненасиченого у насичений, у формі, описаній у [7]:

$$\left[C(h,z)+\frac{\theta(h,z)}{\theta_s(z)}S_s(z)\right]\frac{\partial h}{\partial t}= \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(k(h,z)\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial z}\left(k(h,z)\left(\frac{\partial h}{\partial z}-1\right)\right)-S(x,z,t),$$

$$0\le x\le L,\ 0\le z\le L_z,\ t\ge 0$$

де $h(x,z,t)$ – напір, *м*, $C(h,z)=\frac{\partial\theta}{\partial h}$ – диференціальна вологоємність, $\theta(x,z,t)$ – об'ємна вологість ґрунту, *%*, $\theta_S(z)$ – вологість насичення, *%*, $S_S(z)$ – коефіцієнт пружної ємності, *1/м*, $k(h,z)$ – коефіцієнт вологоперенесення, *м/с*, *S(x,z,t)*– функція, *1/с*, що моделює екстракцію вологи корінням рослин.

Ґрунт вважається таким, що має шарувату структуру. Основна гідрофізична характеристика (ОГХ) ґрунту описується за моделлю ван Генухтена у формі $\theta(h)=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{\left[1+\left(10\alpha|h|\right)^n\right]^{1-1/n}}$ зі значеннями коефіцієнтів θ_r, θ_s, α, n, що змінюються від шару до шару. Залежність коефіцієнту вологоперенесення від напору представляється згідно з моделями Муалема, або Авер'янова в залежності від того, яка з них краще описує експериментальні дані.

Ширина області моделювання L дорівнює міждренній відстані. Моделюється одна дрена, яка вважається точковою та розміщеною у точці з $x=L/2$. У точці розміщення дрени задається напір, що дорівнює рівню води у каналах над дреною [4].

Форма функції джерел та крайові умови детально описані у [6, 8], а особливості моделювання взаємодії дрени та ґрунтового середовища – у [6]. Чисельне розв'язання початково-крайової задачі виконується згідно з неявною скінченно-різницевою схемою Кранка-Николсон на рівномірній різницевій сітці за простором з використанням алгоритму адаптивного підбору кроку за часом. Використана чисельна методика детально описана у [9].

A. Процедура визначення глибини закладання та відстані між дренами

У випадку, коли критична функція — дренування і допускається додаткове поверхневе зрошення, процедура визначення оптимальної глибини закладання дрен та відстані між ними була запропонована у [6].

В межах цієї процедури, модельована глибина закладання дрен зменшується з заданим кроком починаючи від глибини дна каналу закінчуючи глибиною шару, якому потрібне дренування на початку сезону. Для кожного значення глибини методом бісекції визначається [6]:

1. максимальна міждренна відстань, за якої система виконує функцію дренування на початку сезону;

2. мінімальне, за визначеної на попередньому кроці міждренної відстані, значення стабільно підтримуваного рівня води у каналах за якого, у стані наближеному до стаціонарного, мінімальний середньозважений напір у кореневмісній зоні є більшим за рівень передполивного порогу у ситуації низького водоспоживання. За цього вимагається, щоб максимальний середньозважений напір у кореневмісній зоні не перевищував значення, за якого ґрунт вимагає дренування;

3. аналогічне мінімальне значення стабільно підтримуваного рівня води у каналах для ситуації високого рівня водоспоживання та максимально розвиненої кореневої системи рослин.

Якщо на всіх трьох етапах процедури були одержані відповідні значення, то вважається, що глибина розміщення та визначена міждренна відстань є допустимими. Оптимальною вважається глибина, за якої міждренна відстань є найбільшою.

У випадку, коли критичною функцією вважається забезпечення водоспоживання, у цій роботі пропонуються наступні зміни процедури моделювання.

Для кожної з глибин, на першому кроці визначається максимальна міждренна відстань, за якої система забезпечує виконання функції дренування (пункт 1 у вищеописаній процедурі).

Далі, методом бісекції знаходиться максимальна міждренна відстань (в інтервалі від мінімально допустимої до визначеної на першому кроці) за якої система забезпечує водоспоживання (пункти 2 та 3 у вищеописаній процедурі).

III. Вихідні дані для моделювання

У презентованому дослідженні була проведена серія обчислюваних експериментів по визначенню оптимізованих значень конструктивних параметрів систем подвійної дії на основі даних щодо гідрофізичних властивостей різнотипних ґрунтів, що дренуються.

A. Загальні параметри моделі.

◦ Радіус дрени – 0.2 м, довжина дрени (відстань між каналами) – 150 м. Глибина залягання водотриву (потужність області моделювання) – 3м.

◦ Глибина каналу – 2 м, ширина каналу – 3 м.

◦ Мінімальний підтримуваний діапазон середніх напорів у кореневмісній зоні – 40 кПа (або напір, якщо він менший за 40 кПа, за якого коефіцієнт вологоперенесення дорівнює 10^{-3} м/добу). Дренування шляхом зниження рівня води у каналах здійснюється при середньому рівні напорів у кореневмісній зоні, більшому за 5 кПа.

◦ Евапотранспірація (ЕТ) для випадку високого рівня водоспоживання дорівнювала 6 або 10 мм/добу, а для випадку низького рівня — 2 мм/добу. Відстань між рослинами – 66 см, глибина кореневої системи за високого водоспоживання дорівнювала 50 см, а за низького — 20 см;

◦ на початку сезону внаслідок дренування глибина до вологонасиченої зони мала бути доведена до 40 см за не більше ніж 5 діб.

B. Ґрунти та їх гідрофізичні параметри

Досліджувались наступні ґрунти, характерні для зони осушення:

Органогенні ґрунти:

(1) - осушуваний торфовий ґрунт на землях Панфильської дослідної станції, Київська обл.;

(2), (3) – два торфових ґрунти на землях Сарненської дослідної станції, Рівненська обл.;

Мінеральні ґрунти:

(4), (5), (6), (7) – лучно-чорноземні ґрунти у с. Небелиця, Київська обл. [(4), (7) – суглинок легкий, (5) – суглинок середній, (6) – пісок];

(6) – піщаний ґрунт у с. Небелиця, Київська обл.;

(7) – супіщаний ґрунт у с. Небелиця, Київська обл.;

(8), (9) – супіщаний та піщаний ґрунти на землях ОС Мельницька та Бобровка Ковельського р-ну Волинської обл.;

(10) – піщаний ґрунт у с. Маковище, Київська обл.

Коефіцієнти моделей ван Генухтена та Авер'янова або Муалема були одержані мінімізацією середньоквадратичних відхилень від експериментальних даних стосовно кривої висушування. Приклад графіків залежностей вологості та коефіцієнту вологоперенесення від напорів наведено на рис. 1, 2.

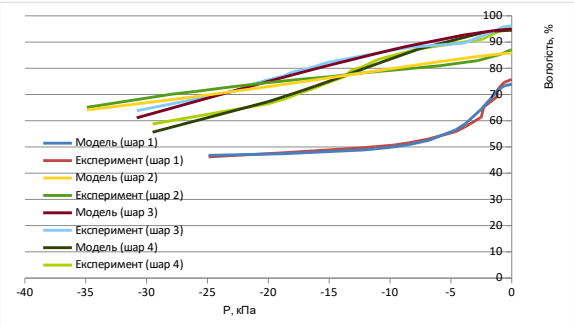


Рисунок 1. Залежність вологості від напорів для ґрунту (1) — Панфильська дослідна станція, торф

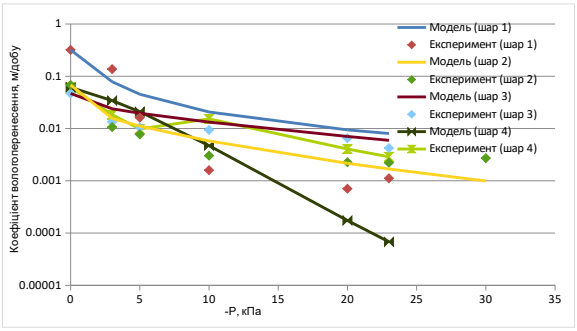


Рисунок 2. Залежність коефіцієнту вологоперенесення від напорів для ґрунту (1) — Панфильська дослідна станція, торф

IV. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

У випадку, коли критичною функцією є дренування, використовуючи процедуру визначення параметрів, були отримані наступні результати.

Максимальна міждренна відстань, за якої забезпечується швидке дренування поверхневого шару ґрунту на початку сезону вегетації очікувано зменшується зі зменшенням глибини закладання дрен. Найбільші відстані були отримані для торфових ґрунтів (> 50 м при глибині закладання у 2 м). Найменші — для лучних чорноземів суглинкового гранулометричного складу (6-11 м при глибині закладання у 2 м). Для пісків та супісків відстані знаходились у діапазоні значень від 11 до >50 м;

За розміщення дрен на визначеній максимальній міждренній відстані, на торфових ґрунтах водоспоживання у початковий період вегетації при ЕТ=2 мм/добу забезпечується за всіх глибин розміщення дрен при рівні ґрунтових вод (РГВ) ~0.5 м. На піщаних та супіщаних ґрунтах у деяких випадках, згідно з моделлю, водоспоживання не може бути забезпечене навіть у початковий період вегетації, або забезпечується лише при закладанні дрен не глибше, ніж на 1.5 м при утримуваному РГВ <0.3 м. В інших випадках, воно забезпечується, аналогічно випадку торфових ґрунтів, при РГВ ~0.5 м. У випадку лучних чорноземів (ґрунти (4)-(6)), водоспоживання у початковий період вегетації забезпечується при закладанні дрен глибше за 1 м при РГВ 0.2-0.5 м;

Для більшості досліджуваних ґрунтів, результати моделювання показують, що водоспоживання у період найвищої евапотранспірації на рівні 10 мм/добу, не може бути забезпечене системою подвійної дії без перезволоження зон ґрунтового масиву навколо дрен. Виняток становлять 2 торфових та 1 супіщаний ґрунти, де при РГВ ~0.5 м водоспоживання на рівні 10 мм/добу забезпечується при закладанні дрен на глибинах 0.5-1.0 м;

У випадку нижчого максимального водоспоживання на рівні 6 мм/добу, згідно з результатами моделювання воно забезпечувалось для торфових ґрунтів при РГВ ~0.5 м для глибин закладання дрен більше 1.5 м, а для деяких випадків і при глибині у 0.75 м. За менш глибокого закладання дрен, забезпечення водоспоживання на рівні 6 мм/добу супроводжувалось перезволоженням. Також, такий рівень

водоспоживання забезпечується системою подвійної дії при РГВ 0.3-0.5 м для одного супіщаного та одного піщаного ґрунту за глибини закладання дрен більше 0.75 м;

Для лучних чорноземів, моделювання показує, що неможливо забезпечити водоспоживання у період його найвищих значень навіть на рівні 6 мм/добу за всіх модельованих конфігурацій системи подвійної дії.

У випадку, коли критичною функцією є водоспоживання, моделювання було проведено для ґрунтів, на яких, згідно з результатами попереднього моделювання, неможливо забезпечити водоспоживання на рівні 6 мм/добу за максимальної міждренної відстані, за якої система виконує функцію дренування. Це лучно-чорноземні ґрунти (4) та (5), супіщаний ґрунт (7) та піски (9) і (10). Моделювання не проводилось для лучно-чорноземних ґрунтів через низькі (<10 м) значення максимальної міждренної відстані, за якої система виконує функцію дренування.

Негативні результати — неможливість забезпечувати водоспоживання на рівні 6 мм/добу за будь-якої міждренної відстані, більшої за мінімальну — були отримані для випадку ґрунтів (7) та (10), на яких, згідно з результатами моделювання, система подвійної дії не здатна забезпечити також і водоспоживання на рівні 2 мм/добу на початку сезону вегетації.

У випадку піщаного ґрунту (9) водоспоживання на рівні 6 мм/добу можливо забезпечити за ~2-кратного зменшення міждренної відстані, у порівнянні з максимальною відстанню, за якої забезпечується виконання функції дренування.

Загалом, результати обчислювальних експериментів показують, що використана методика математичного моделювання дозволяє отримувати оцінки оптимальних значень конструктивних параметрів дренажних систем, що відповідають сільськогосподарській практиці, за відповідних очікуванням з точку зору гідрології тенденцій їх змін при зміні властивостей ґрунтів.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

[1] M. Romashchenko, B. Faybishenko, D. Onopriienko, H. Hapich, R. Novitskyi, D. Dent, R. Saidak, S. Usatyi, and H. Roubik, “Prospects for Restoration of Ukraine’s Irrigation System,” Water International, vol. 50 (2), pp. 104–20, 2025, https://doi.org/10.1080/02508060.2025.2472718

[2] J.-Y. Parlange, W.L. Hogarth, D.A. Barry, M.B. Parlange, R. Haverkamp, P.J. Ross, T.S. Steenhuis, D.A. DiCarlo, and G. Katul, "Analytical approximation to the solutions of Richards' equation with applications to infiltration, ponding, and time compression approximation," Advances in Water Resources, vol. 23(2), pp. 189-194, 1999, https://doi.org/10.1016/S0309-1708(99)00022-6

[3] V.A. Zlotnik, T. Wang, J.L. Nieber, and J. Šimunek, "Verification of numerical solutions of the Richards equation using a traveling wave solution," Advances in Water Resources, vol. 30(9), pp.1973-1980, 2007, https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.03.008

[4] A. Bomba, M. Tkachuk, V. Havryliuk, R. Kyrysha, I. Gerasimov, and O. Pinchuk, "Mathematical modelling of filtration processes in drainage systems using conformal mapping," Journal of Water and Land Development, vol. 39, pp. 11–15, 2018. https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0054

[5] Y. Abduljaleel, A. Awad, N. Al-Ansari, A. Salem, A. Negm, and M.E. Gabr, "Assessment of Subsurface Drainage Strategies Using DRAINMOD Model for Sustainable Agriculture: A Review," Sustainability, vol. 15(2), 1355, 2023. https://doi.org/10.3390/su15021355

[6] M. Romashchenko, and V. Bohaienko, "Mathematical modelling of water regulation processes on dual-action drainage systems," Land Reclamation and Water Management, vol. 1, pp. 26 – 34, 2023. https://doi.org/10.31073/mivg202301-360

[7] A. Dogan, and L.H. Motz, "Saturated-Unsaturated 3D Groundwater Model. I: Development," Journal of Hydrologic Engineering, vol. 10(6), pp. 492-504, 2005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:6(492)

[8] M.I. Romashchenko, V.O. Bohaienko, T.V. Matiash, V.P. Kovalchuk, and A. V. Krucheniuk, "Numerical simulation of irrigation scheduling using fractional Richards equation," Irrigation Science, vol. 39(3), pp. 385-396, 2021. https://doi.org/10.1007/s00271-021-00725-3

[9] V. Bohaienko, A. Gladky, "Multithreading performance simulating fractional-order moisture transport on AMD EPYC," Journal of Numerical and Applied Mathematics, vol. 2, pp. 174-182, 2022. doi:10.17721/2706-9699.2022.2.20

MCIT
Modeling, control & information technologies

Конструкція й принцип роботи гідромеханічних датчиків рівня води в системі гідрорегулятора АРУ-200Ц

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.008

Олександр Богуш
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
o.o.bohush@nuwm.edu.ua

Анотація — ***У статті представлено конструкцію та принцип дії удосконаленого поплавкового датчика рівня води для гідроавтоматичного регулятора АРУ-200Ц. Датчик виготовлено з ПВХ-пластику, що підвищує його корозійну стійкість, знижує вагу та вартість. Запропонована конструкція забезпечує енергоефективне автоматичне регулювання рівня води, стабільність роботи системи та придатна для модернізації осушувально-зволожувальних споруд.***

Ключові слова - АРУ-200Ц, датчик рівня, поплавок, гідрорегулятор, осушувально-зволожувальна система, ОЗС.

I. Вступ

У сучасних умовах експлуатації осушувально-зволожувальних систем (ОЗС) постає нагальна потреба у впровадженні надійних, енергонезалежних та економічно доступних засобів автоматизації регулювання рівня води.

Ефективна автоматизація роботи меліоративних мереж передбачає використання датчиків рівня води, здатних інтегруватися в конструкцію гідрорегуляторів. Тому виникає потреба у встановленні таких приладів під час реконструкції застарілих споруд. На сьогодні на ринку найбільш поширеними є електричні датчики рівня води. Водночас розвиток науки і техніки сприяє вдосконаленню гідромеханічних датчиків, які виступають енергоефективною альтернативою електронним аналогам.

Гідроавтоматичні регулятори рівня води (зокрема АРУ-200Ц) зарекомендували себе завдяки простоті конструкції та незалежності від зовнішнього живлення. Проте для їх подальшого використання необхідно створювати сучасні та доступні за вартістю механічні датчики рівня, які можна безперешкодно інтегрувати у реконструйовані гідроспоруди. [1]

II. Матеріали і методи дослідження

Вимірювання рівня води відіграє важливу роль для підтримання потрібного рівня вологості у сільськогосподарському секторі. Допомагає забезпечити точне і постійне вимірювання води у резервуарі. Існують різні типи датчиків рівня води, які класифікуються за принципом дії: поплавкові, гідростатичні, ємнісні, ультразвукові. Датчики рівня води, які використовуються у гідрорегуляторі АРУ200Ц є датчиками поплавкового типу.

Датчики рівня води у складі гідроавтоматичного регулятора рівня виконують функцію реагування системи на зміни рівня води у водоскидному колодязі. Їх принцип роботи полягає у використанні поплавка, який під дією гідростатичних сил і тиску водяного стовпа змінює своє положення, закриваючи або відкриваючи гідравлічний зв'язок.

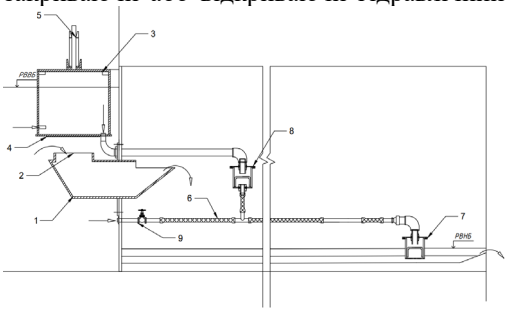


Рис. 1 Будова АРУ 200Ц: 1 - зливний лоток; 2 - кільцевий водозлив водопропускного лотка; 3 - затвор (запірний циліндр);; 4 - ущільнення; 5- рама гідроавтоматичного регулятора; 6 - гідравлічний зв'язок; 7 - датчик рівня;8- датчик-прискорювач; 9 - вентиль для налаштування системи;

При низькому рівні води у дренажній мережі затвор перебуває у відкритому стані, забезпечуючи подачу води в осушувально-зволожувальну систему. У цей час гідравлічний зв'язок залишається розвантаженим, а тиск у системі є недостатнім для закриття затвора. У міру підвищення рівня води в водоскидному колодязі датчик рівня і датчик-прискорювач поступово реагують на зміну гідростатичного тиску. Поплавки піднімаються, перекриваючи витік із гідрозв'язку, що призводить до росту тиску в системі. Як наслідок, поплавок затвор наповнюється водою і він тоне, перекриваючи круглий водозлив. Коли рівень води досягає розрахункової відмітки, затвор повністю закривається, припиняючи подачу води. [2,3] Таким чином, регулятор, у режимі зволоження, автоматично стабілізує рівень ґрунтових вод на потрібній висоті, запобігаючи їх надмірному підняттю.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Будова датчика рівня води

Корпус датчика рівня води (3) виготовлений із ПВХ-пластику товщиною 4 мм, що забезпечує міцність даній конструкції. На днищі корпусу розташовано вісім отворів діаметром 8 мм, які виконують функцію впуску та випуску води. Зверху до корпусу кріпиться кришка (6), яка з'єднана з корпусом болтами через ущільнення (5). У кришці також передбачені вихідні отвори (7), які служать для відведення води. Для підключення до гідрозв'язка використовується різьбове з'єднання: ніпель (2) з різьбою 11/4 дюйма, що кріпиться гайкою (8). У корпусі розташований поплавок (4), який реагує на зміну рівня води.

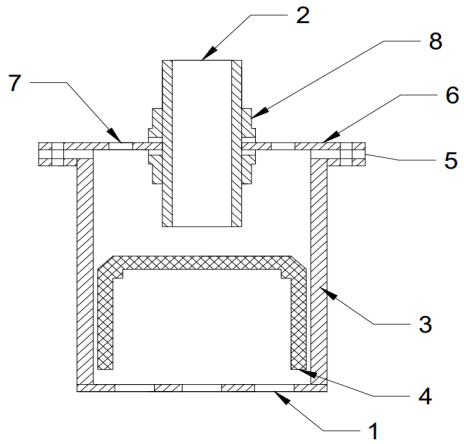
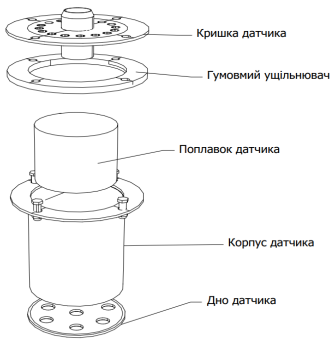


Рис. 2 Будова Датчик рівня води: 1 - отвори впуску і випуску води із датчика; 2 – ніпель для підключення до гідравлічного зв'язка; 3 - корпус датчика рівня; 4 - поплавок; 5 - ущільнення; 6 - кришка датчика; 7 - випускні отвори; 8- гайка монтажу ніпеля.

Принцип роботи датчика

Датчик монтується у водоскидному колодязі на шибері. Коли рівень води досягає встановленої позначки, вода через нижні отвори потрапляє всередину корпусу. Поплавок піднімається і перекриває вихід з гідравлічного зв'язку, утримуючи це положення доти, поки рівень води не почне знижуватися. При зменшенні рівня води поплавок опускається, відкриваючи прохід через ніпель (2). Вода виходить через випускні отвори (7), після чого датчик повертається у вихідний стан, готовий до наступного циклу роботи.



Р. 3 . 3D-модель датчика рівня води:

Енергоефективність та переваги удосконаленого варіанту датчика.

Наявний конструктив використання ПВХ пластику є доцільним через наступні переваги цього виду матеріалу над металом:

1.Корозійна стійкість - пластик не піддається іржі та окисленню у вологому середовищі, на відміну від більшості металів. Це значно збільшує довговічність регулятора.

2.Мала вага - пластикові деталі значно легші, що спрощує монтаж, зменшує навантаження і підвищує чутливість.

3.Низька собівартість - вироби з пластику дешевші у виробництві, оскільки не потребують дорогих сплавів і складної обробки.

4.Простота обробки та формування - пластикові деталі легко виготовляти методом лиття, що дозволяє отримувати складні геометричні форми без додаткової механічної обробки.

5.Хімічна інертність - пластик не реагує з більшістю робочих рідин та домішок у воді, що запобігає утворенню відкладень чи нальоту.

IV. ВИСНОВКИ

Отже, датчики рівня води забезпечують стабільність у сталих режимах і оптимізують перехідні процеси, уникаючи надлишкових витрат води. Датчики пришвидшують реагування системи на зміну рівня води осушувально-зволожувальної системи. Ці датчики працюють за принципом роботи поплавкового механізму. Запропонована конструкція проста, легка у виготовленні.

Таким чином проаналізувавши та дослідивши питання гідромеханічних датчиків рівня води для гідрорегулятора визначили наступне: встановлення датчиків є доцільним.

Адекватність моделей підтверджуються розрахунками. Вони забезпечують енергоефективне та доступне керування АРУ-200Ц, легко інтегруються у вже наявні зволожувально-осушувальні системи. Такі конструктивні рішень допоможуть легко переоснастити наявні системи, удосконалити їх.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] Богуш О.О., Хлапук М.М. Модернізація осушувально-зволожувальних систем Полісся з використанням гідроавтоматичних регуляторів типу АРУ-200Ц / О.О. Богуш, М.М. Хлапук // Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Innovations in Science: From Theoretical Foundations to Practical Impact», Antwerp, Belgium, September 1–3, 2025. — P. 143–144.

[2] Рубан В.П., Яцик А.В., Хлапук М.М., Стасюк Я.П. Гідроавтоматичний регулятор рівнів води : пат. України № 31193 / винахідники В.П. Рубан, А.В. Яцик, М.М. Хлапук, Я.П. Стасюк ; № заяви 31193— Опубл. 2000.

[3] Хлапук М. М. Гідроавтоматичний регулятор рівнів води в модульних осушувально-зволожувальних системах / М. М. Хлапук, А. В. Яцик, Я. П. Стасюк, А. П. Іващенко, С. В. Гусак // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво : зб. наук. праць. – Рівне, 1997. – Вип. 22. – С. 9–1

MCIT
Modeling, control & information technologies

Удосконалення методів визначення коефіцієнта гідравлічного опору з урахуванням просторових характеристик шорсткості трубопроводів

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.009

Любов Волк
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
l.r.volk@nuwm.edu.ua

Іванна Довбенко
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
i.e.dovbenko@nuwm.edu.ua

Анотація — **Проаналізовано існуючі підходи до визначення коефіцієнта гідравлічного опору в трубопроводах і окреслено напрями їх удосконалення з урахуванням просторових характеристик шорсткості внутрішньої поверхні. Запропоновано підхід до побудови багатофакторної аналітичної моделі, яка може підвищити точність розрахунків втрат напору в турбулентному режимі. Одержані результати є основою для подальших теоретичних та експериментальних досліджень у напрямі створення універсальної залежності коефіцієнта гідравлічного опору.**

Ключові слова — коефіцієнт гідравлічного опору, трубопровід, турбулентний режим, шорсткість, втрати напору.

I. Вступ

Гідравлічний опір є ключовим параметром при проєктуванні та експлуатації трубопровідних систем, оскільки він визначає величину втрат енергії потоку, а отже – ефективність транспортування робочого середовища. Величина гідравлічного опору залежить від комплексу факторів: геометричних параметрів трубопроводу, фізичних властивостей рідини, режиму руху потоку та стану внутрішньої поверхні труби.

Проблематика визначення коефіцієнта гідравлічного опору активно досліджується з початку XX ст. Значний внесок у її розвиток зробили Г. Блазіус, І. Нікурадзе, К. Коулбрук, Л. Муді, С. Черчілль, Д. Зігранг, Н. Сілвестер та ін. Незважаючи на велику кількість запропонованих аналітичних і емпіричних залежностей [1–5], більшість з них враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу лише через середню висоту виступів k або через відносну еквівалентну шорсткість k/d. Такий підхід спрощує реальні умови течії та не враховує складну структуру пристінного потоку.

II. Аналіз існуючих методів

Класичні моделі, такі як рівняння Блазіуса, Колбрука–Уайта чи апроксимації Муді та Черчілля, дозволяють оцінити коефіцієнт гідравлічного опору в широкому діапазоні режимів течії. Проте ці моделі побудовані на основі експериментів із трубопроводами, поверхня яких характеризувалася однорідною або рівномірною шорсткістю.

Роботи Й. Нікурадзе (1932–1933) заклали основи розуміння впливу шорсткості на гідравлічний опір, показавши, що перехід від гідравлічно гладкої до квадратичної області опору відбувається поступово та залежить від відносної шорсткості. Проте подальші дослідження показали, що навіть за однакової висоти виступів коефіцієнт опору може суттєво змінюватися залежно від форми та щільності нерівностей.

Аналіз сучасних публікацій свідчить, що більшість емпіричних залежностей мають похибку 5–15 % порівняно з експериментальними даними, особливо в доквадратичній області. Це свідчить про необхідність уточнення підходів до опису шорсткості як багатопараметричної характеристики поверхні.

III. Теоретичні передумови для удосконалення моделі

Гідравлічний опір у трубопроводах визначається силами тертя між потоком і внутрішньою поверхнею труби, а його величина безпосередньо залежить від структури пристінного шару турбулентного потоку. У класичних підходах до розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору враховується переважно середня висота виступів шорсткості або відносна шорсткість ε/d, що не відображає реальної просторової картини взаємодії потоку з нерівностями поверхні. Такий спрощений опис не враховує вплив геометричних параметрів шорсткості на формування турбулентного підшару та характер енергетичних втрат.

Для підвищення точності гідравлічних розрахунків доцільно враховувати комплекс додаткових параметрів, що визначають структуру пристінного шару та механізм утворення вихрових зон. Серед них найбільш суттєвими є:

a) Густота виступів на одиницю площі. Збільшення густоти зумовлює інтенсивніше взаємодіяння потоку з поверхнею труби, підвищує частоту виникнення турбулентних пульсацій та посилює обмін імпульсом, що призводить до зростання опору навіть за незмінної висоти виступів.

b) Форма виступів. Геометрія нерівностей (гострі, округлі, кутові) впливає на характер обтікання потоком і механізм відриву струменя. Гострі виступи спричиняють раннє відокремлення потоку та розвиток сильних вихрових структур, тоді як округлі елементи забезпечують більш плавну зміну напрямку руху та менші втрати енергії.

c) Планове розташування виступів. Регулярне або хаотичне розміщення нерівностей визначає характер просторової структури турбулентності. У випадку регулярного розташування формуються впорядковані вихрові зони, тоді як хаотичне розміщення призводить до стохастичних пульсацій і нерівномірного розподілу енергії в пристінному шарі.

d) Об'ємні характеристики шорсткості. Відношення сумарного об'єму виступів до площі внутрішньої поверхні впливає на товщину ламінарного підшару та інтенсивність турбулентного обміну. Зі збільшенням цього параметра зростає рівень енергетичних втрат і змінюється структура течії біля стінки труби.

Урахування перелічених характеристик у математичній моделі дає можливість перейти від традиційного опису виду

$$\lambda = f(\varepsilon/d, Re) \quad (1)$$

до багатофакторної моделі

$$\lambda = f(\varepsilon/d, Re, n, f, p, V/S) \quad (2)$$

де n – густота виступів, f – форма, p – тип розташування, V/S – відношення об'єму виступів до площі поверхні. Такий підхід дозволяє описати вплив шорсткості більш повно і точніше прогнозувати значення коефіцієнта гідравлічного опору.

IV. Очікувані результати та перспективи дослідження

Врахування просторових характеристик шорсткості при визначенні коефіцієнта гідравлічного опору дозволяє очікувати низку важливих наукових і практичних результатів.

1) Зменшення розбіжностей між теоретичними та експериментальними даними. Удосконалена модель забезпечить кращу відповідність розрахункових значень даним натурних і лабораторних вимірювань, що підвищить достовірність гідравлічних розрахунків.

2) Розширення області застосування існуючих залежностей. Уточнені формули будуть придатними для трубопроводів з різними видами покриття, матеріалів і технологічних особливостей, зокрема для сучасних полімерних та багатошарових систем.

3) Підвищення точності оцінювання енергетичних втрат. Більш точне визначення коефіцієнта гідравлічного опору забезпечить оптимальні розрахунки насосного обладнання, правильний підбір діаметрів труб і зменшення витрат енергії в системах транспортування рідин і газів.

4) Формування універсальної розрахункової залежності. Урахування впливу додаткових факторів дозволить створити узагальнену модель, придатну для широкого кола інженерних задач – від проєктування промислових систем до гідротехнічних споруд.

5) Наукове підґрунтя для подальших експериментальних досліджень. Побудова багатофакторної моделі стане основою для експериментальної перевірки впливу окремих характеристик шорсткості та подальшого введення емпіричних поправок до існуючих формул.

Таким чином, перехід від одновимірного опису шорсткості до комплексного багатопараметричного підходу є перспективним напрямом розвитку методів гідравлічного розрахунку. Такий підхід підвищує точність визначення коефіцієнта гідравлічного опору, покращує якість технічних рішень у галузі гідравлічного транспорту рідин і створює підґрунтя для оптимізації енергетичних витрат у трубопровідних системах.

V. Висновки

Існуючі методи визначення коефіцієнта гідравлічного опору не враховують повною мірою складну структуру шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу. Урахування додаткових геометричних параметрів шорсткості дає змогу точніше описати структуру пристінного потоку та підвищити точність гідравлічних розрахунків. Розробка узагальненої багатофакторної моделі є перспективним напрямом подальших теоретичних і експериментальних досліджень у цій галузі.

Список використаних джерел

[1] Хлапук М. М., Безусяк О. В., Волк Л. Р. Теоретичні дослідження коефіцієнта гідравлічного опору в гідравлічно гладких трубопроводах. Вісник НУВГП, 2020, №4(92), с. 23–36.

[2] Волк Л., Довбенко І., Безусяк О. Аналіз існуючих досліджень коефіцієнта гідравлічного опору в трубах. Modeling, Control and Information Technologies, 2024, №7, с. 25–27. DOI: 10.31713/MCIT.2024.004.

[3] Nikuradse J. Strömungsgesetze in rauhen Rohren. Forsch. Ver. Dtsch. Ing., 1933, №361, с. 1–63.

[4] Colebrook C.F., White C.M. Experiments with fluid friction in roughened pipes. Proc. Roy. Soc. London, 1937.

[5] Moody L.F. Friction factors for pipe flow. Trans. ASME, 1947, 66(8), 671–684.

Порівняльний аналіз програмного забезпечення для моделювання деформацій ґрунту

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.010

Владислав Жильчук
Національний університет водного господарства та природокористування, НУВГП
Рівне, Україна
v.yu.zhylchuk@nuwm.edu.ua

Наталія Жуковська
Національний університет водного господарства та природокористування, НУВГП
Рівне, Україна
n.a.zhukovska@nuwm.edu.ua

Анотація *— У статті проведено детальний порівняльний аналіз сучасних програмних комплексів для чисельного моделювання напружено-деформованого стану ґрунтів, зокрема PLAXIS 2D/3D, GeoStudio (SIGMA/W), FLAC3D та MIDAS GTS NX. Розглянуто їхні ключові технічні та функціональні характеристики, включно з методами чисельного моделювання, точністю розрахунків, підтримкою 3D-моделювання, інтеграцією гідрогеологічних процесів, складністю навчання, зручністю інтерфейсу, масштабованістю моделей та економічними аспектами, такими як вартість ліцензії та ресурсні вимоги. Проведено систематизацію інформації щодо можливостей моделюванні деформацій кожного програмного комплексу. Матеріали статті демонструють, як порівняння основних характеристик програмних систем дозволяє інженерам, науковцям і освітнім установам обирати оптимальні інструменти для геотехнічного моделювання та планування інфраструктурних об'єктів. Публікація підкреслює значення системного підходу до оцінки функціональних можливостей програмного забезпечення та забезпечення більш ефективного використання цифрових технологій у геотехнічних дослідженнях, проєктуванні та наукових розробках.*

Ключові слова — геотехнічне моделювання, чисельний аналіз, напружено-деформований стан.

I. ЗНАЧЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ДЕФОРМАЦІЙ ҐРУНТУ

Здатність передбачати поведінку ґрунтів під дією навантажень є одним із найважливіших завдань сучасної цивілізації. Умови, в яких працює інженерна інфраструктура, стають дедалі складнішими: підвищується щільність міської забудови, зростає кількість висотних споруд, збільшується інтенсивність транспортних потоків. У таких умовах навіть незначна похибка в оцінці деформацій може спричинити ланцюгові наслідки [6], які в свою чергу призводять до просідання фундаментів або руйнування несучих елементів споруд.

У XXI столітті геотехнічне моделювання стало не лише інженерною потребою, а й частиною глобальної стратегії сталого розвитку. Програмні засоби прогнозування деформацій ґрунту допомагають не лише зменшити ризики під час будівництва, а й оптимізувати використання ресурсів і скоротити витрати матеріалів та енергії.

II. ОСНОВНІ КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У цьому розділі розглядаються чотири популярні програми: PLAXIS 2D/3D, GeoStudio SIGMA/W, FLAC3D та MIDAS GTS NX. Ми виділили основні аспекти, які допомагають зрозуміти, де кожна програма сильна і чим відрізняється від інших.

Перший аспект стосується способу розрахунків і можливостей роботи з ґрунтом. Програми використовують різні методи, що впливає на точність результатів. Важливо також, наскільки програма здатна враховувати складну поведінку ґрунту, наприклад, як він деформується під навантаженням або поступово осідає.

Другий аспект пов'язаний з підтримкою тривимірного моделювання та врахуванням води в ґрунті. Деякі системи дозволяють працювати повністю в 3D, а інші обмежені двовимірним простором. Крім того, можливість моделювати рух підземних вод і поровий тиск дуже важлива для безпечного проєктування споруд.

Третій аспект оцінює здатність працювати з великими проектами та динамічними процесами. Це означає, чи можна моделювати великі котловани, тунелі або швидкі зміни, наприклад сейсмічні події. Тут важливі швидкість роботи програми і її здатність справлятися з великими обсягами даних.

Четвертий аспект стосується зручності користування і можливості інтеграції з іншими системами. Це включає легкість навчання,

інтуїтивність інтерфейсу та сумісність з CAD і BIM. Ці фактори визначають комфорт роботи інженера і ефективність використання програми на практиці.

Надалі будуть представлені таблиці, які показують оцінку кожної програми за цими критеріями і демонструють їхні відмінності та особливості для різних задач.

Дані в таблиці представлено за наступною шкалою: 5 – найвищий бал, найкращий показник, коли як 0 – найнижча оцінка, найгірший результат.

ТАБЛИЦЯ I. ПОРІВНЯЛЬНА ТАБЛИЦЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Програма	3D	Вода	Динаміка	Великі проєкти	Зручність	Вартість
PLAXIS 2D/3D	5	4	4	4	4	4
GeoStudio SIGMA/W	0	0	0	0	0	5
FLAC3D	5	3	0	5	5	2
MIDAS GTS NX	5	4	4	4	4	4

III. ПОРІВНЯННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Наведений нижче аналіз є результатом власного порівняльного огляду, заснованого на відкритих джерелах, технічній документації та загальних характеристиках програмних продуктів. Варто зазначити, що це дослідження не претендує на повну технічну чи експериментальну достовірність, а радше відображає узагальнене бачення функціональних відмінностей між програмами на основі доступних даних і практичного досвіду використання.

PLAXIS 2D/3D забезпечує високу точність розрахунків та підтримує широкий набір ґрунтових моделей. Програма [1] дозволяє моделювати нелінійну поведінку ґрунту та враховувати процеси осідання і консолідації. Підтримується тривимірне моделювання та моделювання впливу води на ґрунт. Інтерфейс програми інтуїтивно зрозумілий, можливе підключення до інших систем, що зменшує час на освоєння і підвищує ефективність роботи.

GeoStudio SIGMA/W відзначається простотою навчання та швидкістю виконання базових розрахунків. Програма [2] інтегрується з іншими модулями пакету (SEEP/W, SLOPE/W). Можливості тривимірного моделювання та врахування води обмежені, а підтримка великих об'єктів і динамічних процесів менш розвинена. Програма застосовується переважно для навчання та невеликих інженерних проєктів.

FLAC3D [3] призначена для моделювання великих деформацій та динамічних процесів, включно з сейсмічними навантаженнями та вибухами. Програма дозволяє працювати з глибокими котлованами та тунелями. Підтримка тривимірного моделювання середня, моделювання води обмежене. Інтерфейс вимагає додаткового часу на навчання та навичок роботи зі сценаріями.

MIDAS GTS NX поєднує можливості тривимірного моделювання та врахування води з роботою над великими інженерними об'єктами і динамічними процесами. Програма [4] має CAD-подібний інтерфейс, підтримує інтеграцію з BIM-системами. Застосовується для проєктів інфраструктури, де важливі точність розрахунків та ефективність робочого процесу.

IV. ВИСНОВКИ

PLAXIS 2D/3D найкраще використовувати для професійних інженерів, які працюють над складними 3D-проєктами з водою та великими спорудами. Програма демонструє високу універсальність і точність розрахунків, але висока вартість може бути обмежуючим фактором для невеликих компаній або навчальних закладів.

GeoStudio SIGMA/W оптимальна для навчальних цілей та невеликих проєктів, де не потрібна робота з динамічними процесами, великими об'єктами чи складним 3D-моделюванням. Програма доступна за ціною і проста у використанні, що робить її зручною для студентів та інженерів-початківців.

FLAC3D краще підходить для великих і динамічних геотехнічних проєктів, таких як тунелі, котловани або об'єкти, що піддаються сейсмічним або вибуховим навантаженням. Інтерфейс складний, а підтримка води обмежена, тому користувач повинен мати досвід роботи з командними сценаріями.

MIDAS GTS NX програма універсальна для інфраструктурних і будівельних проєктів, де потрібне повноцінне 3D-моделювання та підтримка води. Вона поєднує зручність використання з можливістю інтеграції в BIM-середовище, роблячи її оптимальною для компаній, що працюють з великими і комплексними проєктами.

REFERENCES

[1] Bentley Systems, *PLAXIS 2D/3D Software – Geotechnical Finite Element Analysis*, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.bentley.com/software/plaxis-2d/

[2] Seequent, *GeoStudio SIGMA/W – Stress and Deformation Modeling*, 2025. https://www.seequent.com/products-solutions/geostudio-2d/

[3] Itasca Consulting Group, *FLAC3D – Three-Dimensional Numerical Modeling Software for Geotechnical Analysis*, 2025. https://www.itascacg.com/software/flac3d

[4] MIDAS IT, *MIDAS GTS NX – Geotechnical and Tunnel Analysis System*, 2025. https://www.midasuser.com/en/product/gts-nx

[5] N. Zhukovska, V. Moshynskyi, V. Zhukovskyy, A. Sverstiuk, O. Pinchuk, «Development of Model Predictive Control Algorithm for Managing Deformation of Multilayered Soil Massif under Mass and Heat Transfer», *Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI'2023)*, 14–16 червня 2023 р., Тернопіль, Україна.

[6] M. Kuzlo, V. Moshynskyi, N. Zhukovska та V. Zhukovskyy, «Deformations of soil masses under the action of human-induced factors», *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, vol. 14, no. 1, pp. 111–114,2024. https://ph.pollub.pl/index.php/iapgos/article/view/5824

Оцінка придатності артезіанських свердловин Рівненщини для рибогосподарського використання

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.011

Віктор Мельничук
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
v.g.melnychuk@nuwm.edu.ua

Галина Бровко
Рівненська комплексна геологічна партія
ДП «Українська геологічна компанія»
Рівне, Україна
brovko_g@ukr.net

Тетяна Басюк
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
t.o.basyuk@nuwm.edu.ua

Михайло Столярець
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
stolyarets78@ukr.net

Юрій Дасов
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
dasov_vg22@nuwm.edu.ua

Анотація — **У статті виконано ревізійне гідрогеологічне обстеження самовиливаючих свердловин та території Рівненської області. Досліджені напірні підземні води не проявляють ознак виснаження і забруднення. Їхні дебіти та гідрохімічні показники перебувають у межах норми і засвідчують придатність артезіанських вод для рибогосподарського використання.**

Ключові слова — ***артезіанські свердловини, Рівненщина, водоносний горизонт, дебіт, гідрохімія, риборозведення.***

I. Вступ

З метою проектування споруд для риборозведення (приміщення аквaферм, поля фільтрації, водопроводи, іригаційні канали, підїздні шляхи) ревізійно вивчено доцільність використання артезіанських свердловин (11 св.), відомих на ділянках Рівненської області. Із них 6 свердловин, що розкрили найпродуктивніший водоносний горизонт в заплавних частинах долини р. Горинь, відповідають вимогам щодо гідрогеологічних і геокадастрових умов ділянок риборозведення (аквакультури) [5].

Виконані науково-дослідні роботи з ревізійного гідрогеологічного обстеження самовиливаючих свердловин показали, що досліджені напірні підземні води не проявляють ознак виснаження і забруднення. Їхні дебіти і гідрохімічні показники перебувають у межах норми, але за період функціонування самовиливаючих свердловин зазнали певних змін (пониження pH, зростання дебітів, варіації хімічного складу).

Зазначені свердловини пройдені 30 і більше років тому. Вони технічно занедбані, ніяк не експлувались і потребувують паспортизації у відповідності до чинних вимог [3, 7] за матеріалами попереднього геологічного вивчення надр, виконаного у 1979-1992рр. [1, 8, 9]. Свердловини експлуатують вендський напірний водоносний горизонт.

II. Основні результати дослідження

Напірний водоносний горизонт у відкладах горбашівської світи волинської серії нижнього венду (V1gb) в межах досліджуваних ділянок у басейні р. Горинь має повсюдне поширення і є основним для господарського та питного водокаристування.

В басейні р. Горинь напірний водоносний горизонт у відкладах горбашівської світи представлений перешарування пісковиків від дрібнозернистих до грубозернистих, донизу гравелистих, слабозцементованих рожево-сірих та бурих відтінків, пористих, кварц-польовошпатового складу, тріщинуватих, водоносних. Підстеляються вони на глибині понад 100 м. водовмісними дрібнозернистими пісковиками поліської серії, між якими існує тісний гідравлічний зв’язок.

На ділянці Річиця глибина залягання напірного водоносного горизонту від 50 м до 57 м [8]. Потужність горизонту сягає 50 м. Горизонт

напірний, напори – 63-200 м. Статичні рівні в свердловинах змінюються від +2,25м до +7,83 м, динамічні рівні змінюються від 8,0 до +1,0 м. На ділянці Річиця дебіти свердловин становили 54,0 м3/год. (1296,0 м3/добу) при зниженні рівня на 4,0 м. та 142,2 м3/год. (3413,0 м3/добу), при зниженні рівня на 10,25 м станом на 1990 р.). На ділянці Злазне дебіти свердловин становили 84,2 м3/год. (2020,0 м3/добу) при зниженні рівня на 10,55 м. На ділянці Жалин (рис. 1) - 118,8 м3/год. (2850,0 м3/добу), при зниженні рівня на 8,63 м (станом на 1987 р.).



Рис. 1. Вигляд свердловини 156р, по якій вода здимається із горбашівського водоносного горизонту від глибини 110м. і виливається на заплаву р. Горинь поблизу с. Жалин Рівненського району

За сучасним хімічним складом (табл. 1) вода на ділянці Річиця гідрокарбонатна магнієво-кальцієва, натрієво-кальцієва з мінералізацією 270,0-304,6 мг/дм3, pH-6,9.-8,2. Загальна жорсткість вод змінюється від 2,9 до 3,4 ммоль/дм3, що дає право відносити ці води до м'яких і помірно-жорстких. Сухий залишок 175,0- 210,0 мг/дм 3 ,. з плином часу (35 років) зменшив свою кількість, а хімічний склад напірних вод суттєвих змін не зазнав. Дещо знизився лише водневий показник Рн і станом на жовтень 2020 р. становить 6,0 – 7,1. Дебіт свердловин після 35 років самовиливання залишається достатньо високим без ознак виснаження.

Суттєвою вадою вод напірного горизонту є зависокий вміст в них заліза – до 2,8 мг/дм3. З плином часу кількість його також не зменшилась. За фізичними властивостями води горизонту прозорі, без кольору, без запаху, температура їх влітку 10-14ºС.

Показники епідемічної безпеки питної води і санітарно-токсикологічні показники горбашівського горизонту у1990 р. відповідали безпечним нормам.

За визначеними показниками вода відповідає вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10" Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною"[3] .

Природна захищеність підземних вод від проникнення забруднюючих речовин з поверхні землі залежить від потужності й літологічного складу зони аерації для ґрунтових вод та від фільтраційних властивостей і потужності перекриваючих водотривких товщ для між пластових вод.

Таблиця. 1. Дебіт і гідро-хімічні показники підземних вод із артезіанських свердловин Погоринння

Ділянка	Річиця 1		Річиця 2		Злазне	Жалин
Свердловини та їхні показники						
Показники	**214 ц**	**211ц**	**169ц**	**212 ц***	**154р***	**156р**
Дебіт м^3/добу	>2592	≈2160	≈3456	>864	≈1728	≈5184
pH	6,6	6,5	7,1	6,5		
Температура˚С.	10	10	10	11	12	11
Залізо загальне, мг/дм^3	2,98	2,34	2,71			
Жорсткість загальна, ммоль/дм^3	3,2	2,6	3,4			
Загальна лужність, ммоль/дм^3	2,8	3	3,6			
Сульфати, мг/дм^3	-	-	-			
Хлориди, мг/ дм^3	3,67	5,65	5,65			
Нітрати, мг/дм^3	0,113	0,033	0,053			
Нітрити, мг/ дм^3	0,002	0,008	0,014			
Амоній, мг/ дм^3	0,82	1,265	0,775			
Сухий залишок* при 110° С, мг/дм^3	150	165	190			

*□- Свердловина частково затампонована.

Аналізи якості води виконані гідрохімічною лабораторією кафедри водопостачання і водовідведення та бурової справи Національного університету водного господарства та природокористування (м.Рівне, вул. В. Чорновола, 41, навчальний корпус №4, каб. 429)

Ґрунтові води водоносних горизонтів плейстоцену та верхньої крейди, що залягають першими від поверхні землі і не перекриваються водотривкими утвореннями, на даній території не захищені. Часто такі ґрунтові води забруднені нітратами, нітритами, аміаком, фенолами, органічними сполуками, важкими металами, нафтопродуктами. Враховуючи незахищеність ґрунтових вод четвертинного водоносного комплексу, та в зв'язку з великою ймовірністю забруднення, вони не придатні для рибогосподарського використання у екофермах за проектом «Аквакультура».

Напірний водоносний горизонт у відкладах горбашівської світи волинської серії нижнього венду екранується зверху водотривкою товщею потужністю 20 м туфоаргілітів бабинської світи, тому найкраще захищений. Напірні води даного водоносного горизонту більш захищені, ніж ґрунтові, тому що перекриті пачкою потужністю до 20 м водотривких туфоаргілітів, а також товщею потужністю до 50 м вулканічнічних туфів бабинської світи. Проникнення до нього забруднених грунтових вод упереджується також сорбційними очистними властивостями цеоліт-смектитової туфової товщі, що залягає над водотривом.

Даний водоносний горизонт найпродуктивніший у регіоні і ще не виснажений. У ньому вже багато

років функціонує Горбаківський водозабір для питного водозабезпечення м. Рівне. Він найбільш придатний для використання його вод у аквафермах за проектом «Аквакультура».

ІІІ. ВИСНОВКИ

За результатами аналізу матеріалів гідрогеологічних робіт попередніх років і теперішніх ревізійних досліджень придатності самовиливаючих свердловини для облаштування споруд з риборозведення доцільно константувати наступне.

На території Рівненської області для зазначених цілей найпридатніші ділянки самовиливання підземних вод з горбашівського водоносного горизонту, розташовані у долині р. Горинь. Даний горизонт добре вивчений [1, 8] і наразі використовується для питного водопостачання і господарських потреб м. Рівне та інших населених пунктів. Із 11 досліджених самовиливних свердловин 6 свердловин в заплавних частинах долини р. Горинь відповідають вимогам щодо гідрогеологічних і геокадастрових умов ділянок риборозведення (аквакультури) [5].

За гідрогеологічними і геокадастровими умовами для зведення споруд з риборозведення першочергово рекомендується ділянка «Річиця 1», на якій самовиливаючі свердловини (св. 169ц, 211ц, 214ц) просторово зближенні, наразі мають достатній дебіт і задовільні гідрохімічні характеристики води. Сприятливі гідрогеологічні і геокадастрові умовами для облаштування споруд з риборозведення мають також ділянки артезіанських вод «Жалин» (св. 156) і «Злазне» (св. 154) На даних ділянках рекомендується виконати геологічне вивчення надр [4] з метою підрахунку і затвердження запасів підземних вод у ДКЗ України, а в подальшому - нормативні інженерні вишукування [2] під будівництво споруд з риборозведення на стадіях ескізний проект (ЕП) та проект(П).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] *Гочачко О.О.* Гідрогеологічна та інженерно-геологічна зйомка масштабу 1:50000 для цілей меліорації на території аркушів М-35-26-Г; М-35-38-Б,Г; М-35-39-А,Б,В, 1986-1989 гг. Рівне,1989.

[2] ДБН А.2.1-1-2014. Державні будівельні норми України. Інженерні вишукування для будівництва. - Київ. - Мінрегіонбуд України. -2014. 72 с.

[3] ДСанПіН 2.2.4-171-10. Державні санітарні норми і правила "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною".

[4] Закон України від 27.07.94 № 132/94-ВР "Кодекс України про надра".

[5] Закон України про аквакультуру. // Відомості Верховної Ради (ВВР), 2013, № 43, ст.616.

[6] *Мельничук В. Г.* Цеоліт-смектитові вулканічні туфи Рівненщини та перспективи їх господарського використання / В. Г. Мельничук // Зб. наук. пр.: Вісник УДУВГП.– Рівне. – 2002. – Вип. 5(18) : ч. 1. – С. 107-114.

[7] Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України, Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України 6.04.2016 N 145/84.

[8] *Сухомлин В.І.* Попередня розвідка подземних вод для господарсько-питного водопостачання м. Рівне. Ділянка Тучинско-Олександрійська, 1989-1992 р.р. - Рівне, 1992.

[9] *Тарасов Л.В. та інші*. Звіт про результати пошуків підземних вод для зрошування культурних пасовищ господарств Рівненської області, виконаних у 1979-1980рр.. – Львів: 1980.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Правові та регуляторні бар'єри інвестування у модернізацію іригаційної інфраструктури України

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.012

Інна Мельничук
Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
i.m.melnychuk@nuwm.edu.ua

Тези доповіді присвячені розгляду правових та регуляторних перешкод, що обмежують інвестиційну активність у сфері модернізації іригаційної інфраструктури України. Наголошено, що в умовах зміни клімату й підвищення ризиків посухи роль зрошення стає вирішальною для забезпечення сталого виробництва сільськогосподарських культур, особливо у південних та центральних регіонах. На основі аналізу нормативно-правових актів, аналітичних звітів Світового банку , BRDO та фахових досліджень ідентифіковано основні бар'єри: невизначеність прав власності на меліоративні системи, обмеження у бюджетному фінансуванні, недосконаліть тарифоутворення, дублювання управлінських функцій між органами влади, податкові та процедурні перепони, а також ризики, зумовлені військовим конфліктом. Запропоновано напрями удосконалення правового регулювання для створення сприятливого середовища інвестицій у відновлення та розвиток зрошувальних систем. що обмежують інвестиційну активність у сфері модернізації іригаційної інфраструктури України.

The theses of the report are devoted to the analysis of legal and regulatory barriers that constrain investment activity in the modernization of Ukraine's irrigation infrastructure. It emphasizes that under climate change and increasing drought risks, irrigation plays a critical role in ensuring sustainable agricultural production, especially in southern and central regions. Based on the analysis of legal acts, World Bank reports, BRDO policy papers, and professional studies, the key barriers were identified: unclear property rights for irrigation systems, limitations of public financing, imperfect tariff regulation, overlapping authorities, tax and procedural obstacles, and risks caused by the ongoing war. The paper proposes directions for improving legal frameworks to create a more favorable environment for investment in the rehabilitation and development of irrigation systems.

Ключові слова — іригаційна інфраструктура, меліорація, інвестиції, правові бар'єри, державно-приватне партнерство, зрошення, сталий розвиток.

Зміна клімату створює серйозні виклики для сталого виробництва сільськогосподарських культур в Україні. Особливо гостро ці проблеми проявляються у південних та центральних регіонах, де кількість посушливих днів і середньорічна температура невпинно зростають [2]. В таких умовах відновлення та модернізація зрошувальних систем набуває стратегічного значення для продовольчої безпеки держави.

Водночас рівень використання іригаційних систем в Україні залишається низьким — не більше 15–20 % від потенціалу, наявного ще у 1990-х роках [2; 4]. Основними причинами є застарілість інфраструктури, зношеність обладнання, недостатнє фінансування й відсутність механізмів залучення приватних інвестицій [1; 3]. Відтак постає необхідність глибокого аналізу правових і регуляторних перешкод, які стримують розвиток іригаційного сектору.

Реформування водного господарства України триває понад десятиліття, однак воно залишається неповним. Прийняття у 2022 р. Закону України «Про організації водокористувачів та стимулювання гідротехнічної меліорації земель» започаткувало створення ВОК (організацій водокористувачів), покликаних взяти на себе управління внутрішньогосподарськими системами зрошення [4]. Законодавство передбачає поступову передачу частини меліоративних об'єктів у власність або користування ВОК, що має стимулювати формування відповідального власника на місцевому рівні.

Разом із тим, значна частина міжгосподарських систем, насосних станцій і магістральних каналів залишаються у державній власності [3]. Відсутність єдиного оператора системи або чітко прописаної моделі співуправління держави й приватного сектору створює правову невизначеність, яка знижує інвестиційну привабливість галузі [1; 5].

Ключові правові та регуляторні перешкоди інвестуванню наступні:

1. Невизначеність прав власності.

Однією з головних проблем є відсутність чіткої ідентифікації прав власності на елементи меліоративної інфраструктури. Часто системи не

зареєстровані в кадастрових реєстрах або мають суперечливий правовий статус [1; 4]. Це унеможливлює використання об'єктів як застави, стримує концесійні та державно-приватні проєкти.

2. Обмеження бюджетного та фінансового законодавства.

Державні водогосподарські організації фінансуються виключно з бюджету і не мають права залучати кредити чи приватний капітал [2; 4]. Через це модернізація магістральних систем практично не відбувається без зовнішньої донорської допомоги.

3. Недосконаліть тарифоутворення.

Діюча система тарифів на подачу зрошувальної води не включає інвестиційної складової, що позбавляє операторів можливості накопичувати кошти на оновлення інфраструктури [7]. Тарифи не відображають реальної вартості води, енергії та амортизаційних витрат, що створює перехресні субсидії між користувачами [7].

4. Дублювання функцій державних органів.

В управлінні водними ресурсами спостерігається паралелізм повноважень між Державним агентством водних ресурсів, Міністерством аграрної політики, місцевими органами влади та окремими держпідприємствами [3; 4]. Це призводить до фрагментації відповідальності, неузгодженості політик і втрати ефективності.

5. Податкові та нормативні бар'єри.

Довгий час перешкодою для передачі об'єктів меліорації у власність ВОК було подвійне оподаткування та питання сплати ПДВ при передачі активів [5]. Хоча у 2025 р. ухвалено закон, що частково усуває ці перепони, залишаються неврегульованими питання обліку, оцінки вартості систем і звільнення від податку на майно.

6. Відсутність ефективних механізмів державно-приватного партнерства.

Попередня редакція законодавства про державно-приватне партнерство (ДПП) не враховувала специфіку меліоративних систем. Лише з оновленням закону про ДПП у 2025 р. з'явилися можливості для укладення угод у сфері іригації [6], однак практична реалізація ще потребує підзаконних актів і типових договорів.

7. Інституційна слабкість організацій водокористувачів

ВОК лише починають формуватись і мають обмежену організаційну, фінансову та управлінську спроможність [4]. Відсутність досвіду підготовки інвестиційних проєктів і складність дозвільних процедур (зокрема, екологічних оцінок) знижують темпи розвитку.

8. Військові ризики та відновлення після руйнувань

Внаслідок бойових дій пошкоджено значну частину гідротехнічних споруд, особливо на півдні [4]. Це збільшує ризики для інвесторів і потребує державних гарантій або міжнародного страхування інвестицій.

Напрями удосконалення правового середовища

Для створення сприятливих умов залучення інвестицій доцільно реалізувати такі кроки:

- Завершити правову інвентаризацію меліоративних систем і забезпечити реєстрацію прав власності на всі об'єкти в державних кадастрах [1; 3].
- Внести зміни до Бюджетного кодексу, щоб державні оператори могли залучати позикові кошти під державні гарантії [2].
- Розробити нову методику тарифоутворення, що включатиме інвестиційну складову та прозорі правила розрахунку вартості води [7].
- Удосконалити законодавство про державно-приватне партнерство, зокрема шляхом затвердження типових концесійних угод для іригаційних проектів [6].
- Розвивати інституційну спроможність ВОК, через грантові програми, навчання та доступ до кредитування [4].
- Створити державну програму страхування інвестицій у водогосподарські об'єкти на територіях, що зазнали руйнувань через війну [4].

Висновки

Модернізація іригаційної інфраструктури є ключовою передумовою для адаптації аграрного сектору України до змін клімату. Однак без усунення правових та регуляторних бар'єрів, чіткої системи управління й ефективного державно-приватного партнерства залучення інвестицій залишатиметься обмеженим. Законодавчі ініціативи останніх років свідчать про поступ до створення нової моделі управління водними ресурсами, проте для досягнення стійкого ефекту необхідна комплексна правова реформа та узгоджена державна політика у сфері меліорації.

[1] BRDO. Інвестувати не можна заборонити: як захистити інвестиції у меліоративні системи. — Київ, 2023.
[2] World Bank. Ukraine Irrigation Strategy. — Washington D.C., 2017.
[3] Agroexpert.ua. Реформа гідротехнічної меліорації: перешкоди, досягнення, перспективи. — 2024.
[4] ICID-CIID. Legal and Institutional Framework for Irrigation Modernization in Ukraine. — WIF4 Proceedings, 2025.
[5] AgroTimes.ua. Президент підписав закон, що усуває перешкоди для реалізації реформи меліорації. — 2025.
[6] CMS LawNow. Ukraine Overhauls Its PPP Regime Facilitating Reconstruction and Investment. — 2025.
[7] Mivg.iwpim.com.ua. Тарифна політика у сфері меліорації земель: сучасний стан і проблеми. — 2024.

Басейнові рибоходи як ключові елементи екологічного покращення водотоків

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.013

Інна Мельничук
Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки
НУВГП
Рівне, Україна
i.m.melnychuk@nuwm.edu.ua

Володимир Корнійчук
Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки
НУВГП
Рівне, Україна
v.i.korniichuk@nuwm.edu.ua

Тези доповіді присвячені ролі басейнових рибоходів як важливих елементів екологічного покращення водотоків та відновлення міграційних шляхів риб і водної фауни. Наведено принцип дії басейнових рибоходів, їхню конструкцію, основні гідравлічні параметри та вимоги до проєктування. Описано різновиди технічних рибоходів — традиційні, ромбові та опуклі — із прикладами їх реалізації. Висвітлено переваги та недоліки таких споруд.

The conference paper focuses on the role of pool fish passes as important elements of ecological improvement of watercourses and restoration of migration routes for fish and aquatic fauna. The principle of operation of pool fish passes, their design, main hydraulic parameters, and design requirements are presented. Different types of technical fish passes — conventional, rhomboid, and humped — are described with examples of their implementation. The advantages and disadvantages of such structures are highlighted.

Ключові слова - басейновий рибохід; рибоходи; міграція риб; гідравлічне проєктування; водозлив; поперечні стінки; підводні вирізи.

Для багатьох видів риб та інших водних організмів, міграція є необхідною умовою для їхнього існування. Найвідомішими є міграції таких видів, як лосось та вугор, які долають сотні чи тисячі кілометрів, повертаючись з моря до своїх нерестовищ у річках. На додаток до цих видів, що мігрують на великі відстані, інші риби та безхребетні здійснюють більш-менш короткострокові або невеликі міграції з однієї частини річки до іншої на певних фазах своїх життєвих циклів.

Рибоходи набувають все більшого значення для відновлення вільного проходу для риб та інших водних видів у річках, оскільки такі пристрої часто є єдиним способом уможливити проходження водної фауни через перешкоди, що блокують їхню подорож угору за течією. Таким чином, рибоходи стають ключовими елементами для екологічного покращення водотоків. Їх ефективне функціонування є передумовою для відновлення вільного проходу в річках. Однак дослідження існуючих пристроїв показали, що багато з них не функціонують належним чином. Тому, є потреба у загальноприйнятих критеріях проєктування та інструкціях, які відповідають сучасному рівню досвіду та знань.

Рибоходи можуть бути сконструйовані як у технічний спосіб, так і таким чином, щоб імітувати природу. Обвідні канали та рибні пандуси (рами) належать до більш природних рішень, тоді як більш технічні рішення включають басейнові рибоходи, щілинні (вертикальні) рибоходи, рибоходи типу Деніла (з протитечією), вугрові східчасті рибоходи, рибні шлюзи, рибопідіймачі [1].

Розглянемо басейновий рибохід, його принцип роботи та підходи до проектування. Принцип дії басейнового рибоходу полягає в тому, що канал, який з'єднує верхній б'єф із нижнім, поділяється поперечними стінками на послідовність ступінчастих басейнів. Протікання води зазвичай відбувається через отвори в поперечних стінках, а потенціальна енергія води поступово розсіюється в кожному басейні (рис. 1) [2].

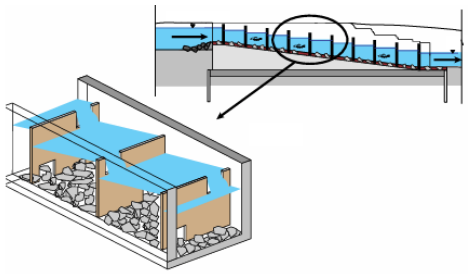


Рис.1. Традиційний басейновий рибохід (поздовжній переріз і структура басейну)

Риби проходять із одного басейну до іншого через отвори у поперечних стінках, які розташовані або внизу (підводні вирізи), або вгорі (переливні вирізи).

Під час міграції риби стикаються з високими швидкостями течії лише у місцях проходу через отвори, тоді як у самих басейнах, де швидкість потоку низька, вони можуть знайти укриття та місце для відпочинку.

Наявність шорсткого дна є обов'язковою умовою, щоб басейнові рибоходи були доступними для донної фауни.

Конструкція басейнових рибоходів зазвичай має пряму конфігурацію — від верхнього до нижнього б'єфа (рис.2.б).

Однак також застосовують вигнуті рибоходи (рис.2.а) або такі, що повертаються на 180° (іноді навіть кілька разів, як показано на рисунку 2.в), що дозволяє зменшити загальну довжину споруди.

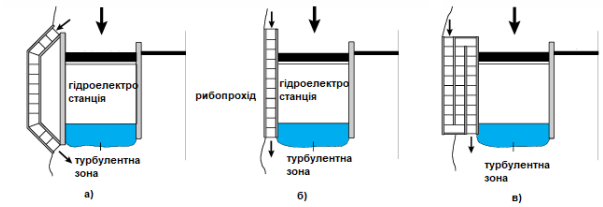


Рис. 2. Басейнові рибоходи (вигляд зверху)

Вихід води (тобто вхід у рибохід з нижнього боку, розташований нижче греблі або виходу турбіни) слід розташовувати так, щоб не утворювалися "мертві зони" або тупикові потоки. Основні принципи розміщення визначають оптимальну відстань між входом у рибохід, греблею чи водозливом турбіни.

Альтернативний варіант конструкції та розташування басейнів показано на рисунку 3.



Рис.3. Басейновий рибохід, збудований із клінкерної цегли, з чергуванням басейнів, розташований біля млинової греблі у місті Гуде на річці Берне (Нижня Саксонія). Конструкція гармонійно вписується в історичний вигляд старого млина.

Перепади рівнів води між окремими басейнами визначають максимальні швидкості потоку, а отже, є ключовим фактором, який впливає на здатність риби долати споруду.

У найгіршому випадку перепад рівня води (Δh) не повинен перевищувати 0,2 м; проте оптимальним вважається перепад Δh = 0,15 м при нормальному рівні заповнення водойми.

Оптимальний ухил рибоходу розраховується на основі різниці рівнів води та довжини басейнів (l_b).

Таким чином, при довжині басейну від 1,0 до 2,25 м ухил становить від 1:7 до 1:15. Більш круті ухили можна досягти лише шляхом скорочення довжини басейнів, за умови, що допустимий перепад рівнів води не перевищено. Однак це призводить до значної турбулентності потоку в басейнах, тому таких рішень бажано уникати.

Канали басейнових рибоходів зазвичай будують із бетону або природного каменю. Поперечні перегородки (стінки) можуть бути виконані з дерева або збірного залізобетону.

Розміри басейнів необхідно підбирати так, щоб риби, що піднімаються вгору, мали достатньо простору для руху; енергія потоку розсіювалася поступово, без надмірної турбулентності; але швидкість потоку не знижувалася настільки, щоб спричинити замулення басейнів. Щоб уникнути надмірної турбулентності, об'ємна потужність розсіювання енергії не повинна перевищувати: 150 Вт/м³ для більшості випадків; 200 Вт/м³ — у зоні лососевих риб.

Розміри басейнів слід підбирати з урахуванням поведінкових особливостей риб, які можуть проходити через споруду та очікуваних розмірів і кількості мігруючих особин. У таблиці 1 подано рекомендовані мінімальні розміри басейнів і параметри поперечних стінок, узагальнені з різних джерел літератури та адаптовані до гідравлічних критеріїв і емпіричних даних успішно функціонуючих рибоходів (див. рис.4).

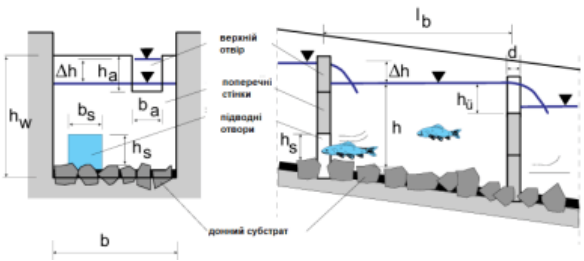


Рис. 4. Термінологія басейнових рибоходів

Мінімальні розміри застосовуються для менших водотоків, а більші — для річок із більшими витратами води. Якщо досягти рекомендованих довжин басейнів і витрат води неможливо, слід розглянути альтернативний тип рибоходу.

Дно басейнів повинно мати шорстку поверхню, щоб зменшити швидкість течії біля дна та полегшити проходження донної фауни та дрібних риб. Шорстку поверхню створюють, вмуровуючи каміння в бетон до його затвердіння.

Традиційні басейнові рибоходи характеризуються наявністю вертикальних поперечних стінок, розташованих під прямим кутом до осі басейну (див. рис.1).

Такі стінки можуть бути суцільними (бетонними або кам'яними) чи дерев'яними.

Дерев'яні перегородки дають змогу легко вносити зміни до конструкції, але потребують заміни через кілька років експлуатації.

У поперечних стінках робляться підводні отвори, які розташовуються почергово з різних боків у нижній частині стінки (розміри подані в таблиці 1) [3].

Через ці отвори риби піднімаються у наступний басейн. Отвори доходять до дна басейну, що дозволяє створити суцільне шорстке дно, коли поверх нього укладають субстрат. Значення поверхневих вирізів часто переоцінюють, адже

більшість риб при міграції спершу намагаються плисти проти течії, а не стрибати через перешкоду. Крім того, турбулентність, яка виникає від струменів води, що виходять із поверхневих отворів, негативно впливає на умови течії в басейнах.

При змінних рівнях верхнього б'єфа занурені поперечні стінки ускладнюють регулювання витрат води.

Однак, якщо поверхневі отвори все ж передбачені, їх нижній край повинен бути занурений у воду нижнього басейну, щоб уникнути падаючого (пірнаючого) струменя, який заважає рибам перепливати перешкоду.

Рекомендовані розміри для вирізів наведено в таблиці 1.

Вид риби, що враховується	Довжина басейну l_b (м)	Ширина басейну b (м)	Глибина води h (м)	Розміри підводних отворів: ширина b_s, висота h_s (м)	Розміри поверхневих вирізів: ширина b_a, висота h_a (м)	Витрата води через рибохід Q (м³/с)	Макс. перепад рівня води Δh (м)
Осетер	5.0 – 6.0	2.5 – 3.0	1.5 – 2.0	1.5 × 1.0–2.5	–	0.20	–
Лосось, морська форель, харіус дунайський	2.5 – 3.0	1.6 – 2.0	0.8 – 1.0	0.4 – 0.5 × 0.3 – 0.4	0.3 × 0.3	0.2 – 0.5	0.20
Харіус, ялець, лящ та інші види	1.4 – 2.0	1.0 – 1.5	0.6 – 0.8	0.25 – 0.35 × 0.25 – 0.35	0.25 × 0.25	0.08 – 0.20	0.20
Верхня зона форелі	> 1.0	> 0.8	> 0.6	0.2 × 0.2	0.2 × 0.2	0.05 – 0.10	0.20

ТАБЛИЦЯ 1. РЕКОМЕНДОВАНІ РОЗМІРИ БАСЕЙНОВИХ РИБОХОДІВ

Примітки до таблиці 1:

1. Розміри вказані як орієнтовні мінімальні значення.
2. Розміри отворів (b_s, h_s) залежать від розмірів риби, що мігрує.
3. Поверхневі вирізи передбачаються лише за необхідності.
4. Витрати води визначаються розрахунками для конкретного рибоходу.
5. Значення наведено за літературними джерелами, адаптованими до гідравлічних і біологічних умов.
6. Максимальний перепад рівнів води між басейнами не повинен перевищувати 0,2 м.

Загалом, занурення поперечних стінок слід уникати, наскільки це можливо, щоб вода проходила лише через вирізи, а не переливалася поверх стінки.

Особливо негативний ефект мають занурені поперечні стінки на виході рибоходу (вхід для риби з нижнього б'єфа), оскільки в такому разі не формується достатній спрямований потік (принаджуючий потік), який допомагає рибам знайти шлях у споруду.

Ромбовий рибохід відрізняється від традиційного басейнового тим, що поперечні стінки розташовані під кутом до осі басейну і спрямовані вниз за течією (див. рис. 5 і 6).



Рис.5. Конструкція поперечних стінок ромбового рибоходу.

Послідовні поперечні стінки кріпляться почергово до протилежних стінок каналу — одна до правої, наступна до лівої. У результаті кожен басейн має один довгий бік і один короткий бік. Довжина короткого боку не повинна бути меншою ніж 0,3 м, а довжина довгого боку має становити щонайменше 1,8 м.

Підводні вирізи завжди розміщуються на верхньому кінці поперечної стінки (тобто ближче до входу потоку), а поверхневі вирізи — у нижньому (вихідному) куті басейну.



Рис. 6. Приклад ромбового рибоходу (водозлив Лемген на річці Мозель, вигляд з нижнього б'єфа)

Кут нахилу поперечних стінок відносно дна рибоходу становить приблизно 60°, а кут між поперечними стінками та віссю басейну — від 45° до 60°. Через це стінки мають нерегулярну ромбоподібну форму, що й дало назву конструкції — «ромбовий рибохід».

Для будівництва правих і лівих стінок необхідно використовувати окремі опалубки, оскільки вони не є дзеркальними і нахилені в протилежні боки.

В усіх інших аспектах (розміри басейнів, отвори, глибина води тощо) застосовуються ті самі рекомендації, що й для традиційних басейнових рибоходів, наведені в таблиці 1.

Перевагами цієї конструкції є покращені гідравлічні умови течії в басейнах та краще самоочищення споруди. Нахилені поперечні стінки діють як спрямовуючі елементи, які допомагають рибам орієнтуватися та знаходити наступний отвір для проходу.

Опуклий рибохід, розроблений Шіменцом (Schiemenz), є спеціальним різновидом басейнового рибоходу, в якому вирізи виконані у вигляді розширених обтічних каналів (рис. 7).

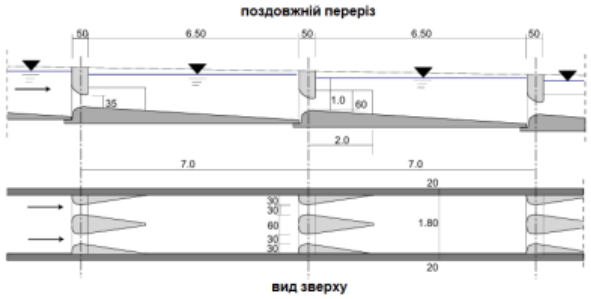


Рис. 7. Проєктування та розміри басейнів опуклого рибоходу на греблі Гестгахт на річці Ельба

На відміну від інших типів басейнових рибоходів, вирізи не зміщені один відносно одного, а розташовані по одній осі.

Під час гідравлічних модельних експериментів форму каналів було оптимізовано таким чином, щоб у басейнах практично не виникало вихорів. У результаті потік у кожному басейні має чітко спрямований характер, що полегшує рибам орієнтацію та проходження через споруду.

Опуклі рибоходи потребують довгих басейнів і допускають лише невеликі перепади рівнів води між басейнами - приблизно Δh = 0,14 м.

Тому їх доцільно застосовувати лише у випадках, коли потрібно подолати невеликий перепад висот (малий напір) та є достатньо місця для розміщення довгої конструкції.

Практичний досвід використання опуклих рибоходів показує, що вони також підходять для видів риб зі слабкою плавальною здатністю. Якщо у споруді передбачено шорстке дно, вона може також забезпечувати прохід донної фауни.

Основними недоліками цього типу рибоходів є велика площа, необхідна для будівництва, та високі технічні вимоги до форми обтічних отворів каналів.

Басейнові рибоходи належать до найстаріших типів рибопропускних споруд і, безумовно, довели свою ефективність там, де їх проєктування, планування та обслуговування виконувались належним чином. Вони є ефективними засобами забезпечення міграції риб біля гребель — як для видів із сильною плавальною здатністю, так і для донних та дрібних риб.

У таких рибоходах можна створити суцільне шорстке дно, простір між елементами якого слугує шляхом для руху донної фауни.

Перевагою басейнових рибоходів є відносно невеликі потреби у воді — від 0,05 до 0,5 м³/с, за звичайних розмірів оріфісів і перепадів рівнів води.

Однак вони мають і суттєвий недолік — високі вимоги до технічного обслуговування, оскільки існує значний ризик засмічення оріфісів уламками чи сміттям.

Практичний досвід показує, що багато басейнових рибоходів не функціонують більшу частину часу саме тому, що отвори забиті сміттям. Тому такі споруди потребують регулярного технічного обслуговування та очищення - щонайменше один раз на тиждень.

[1] ВНД 33-2.3-04-01. Рибозахисні та рибопропускні споруди. – Введ. 20.08.2001. – Київ: Державний комітет України по водному господарству, - 2001. – 45с.

[2] Fish passes – Desing, dimensions and monitoring. – Rome: FAO, 2002. – 112 p.

[3] Larinier M/ Implantation des passes a poissons / Larinier M. – Bull. Fr. Peche Piscic. 326/327, 1992 – C. 30-44.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Принципи фізичного моделювання циркуляційних систем технічного водопостачання

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.014

Юрій Омельчак
Кафедра гідротехніки та водної іінженерії
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Украхна
yurii.p.omelchak@lpnu.ua

Ігор Попадюк
Кафедра гідротехніки та водної іінженерії
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Украхна
Ihor.y.popadiuk@lpnu.ua

Abstract – ***Проблема забезпечення надійної роботи систем циркуляційного водопостачання (СЦВ) вимагає детального дослідження як стаціонарних, так і нестаціонарних (перехідних) режимів. У статті проведено аналіз кінетики гідродинамічних явищ у напірних трубопроводах СЦВ закритого типу, що характеризуються великими діаметрами труб і переважанням втрат напору на місцевих опорах над втратами на тертя по довжині. Показано, що в таких системах переважаюче значення має сила тяжіння.***

Ключові слова: циркуляційне водопостачання, фізичне моделювання, критерій Фруда, число Рейнольдса, автомодельність, геометричний масштаб, перехідні процеси.

Метою статті є визначення основних принципів фізичного моделювання гідравлічних процесів у замкнутих системах оборотного водопостачання.

ПРИНЦИПИ ВИБОРУ МАСШТАБУ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ СЦВ

Вибір лінійного геометричного масштабу (C_L) є одним із найважливіших етапів проєктування фізичної моделі гідравлічної установки (*Chanson, 2004*).

Для досягнення максимально повної гідродинамічної подібності між натурним та модельним явищем бажано обирати якомога менший лінійний масштаб. Проте, економічні фактори накладають суттєві обмеження на цей вибір. При збільшенні геометричного масштабу різко знижуються економічні видатки на створення та експлуатацію модельної установки. Наближений аналіз показує, що капітальні затрати обернено пропорційні до C_L^3, а експлуатаційні видатки — до C_L^4 *(Hughes,1993)*. У випадку напірних гідравлічних систем, які складаються з труб особливо великих діаметрів, економічний фактор набуває надзвичайно важливого значення, безпосередньо впливаючи на вибір C_L.

Іншою принципово складною проблемою адекватного моделювання заданої системи циркуляційного водопостачання (СЦВ) є необхідність дотримання комплексної подібності: подібність напірних потоків у трубопроводах та подібність характеристик натурного та модельного насосного обладнання.

При моделюванні перехідних процесів у СЦВ накладаються додаткові обмежувальні умови, зокрема, необхідність забезпечення подібності моментів інерції робочих коліс насосів (разом із приєднаною масою рідини), а також подібності у поширенні хвильових явищ.

Таким чином, вибір лінійного масштабу моделі має базуватися на детальному теоретичному та чисельному аналізі питомої ваги усіх діючих сил, моментів та інших факторів. Це необхідно для ідентифікації найбільш важливих із них, які визначатимуть поведінку системи як у стаціонарних, так і в перехідних режимах роботи СЦВ.

ВИБІР ОСНОВНОГО ВИЗНАЧАЛЬНОГО КРИТЕРІЮ ПОДІБНОСТІ

При моделюванні складних гідродинамічних явищ, що відбуваються в системах циркуляційного водопостачання, постає питання вибору основного визначального критерію гідродинамічної подібності.

Порівняльний аналіз показав, що при стаціонарних процесах у закритих СЦВ переважаюче значення має сила тяжіння. Це твердження можна пояснити на наступному прикладі.

При стаціонарному режимі роботи всіх насосів деякої замкнутої системи один насос НСГ марки 170ДПВ12/22ЭГ подає Q_I=12,6 м^3/с води при напорі

H_1=19,0 м. При цьому геометрична висота подачі складає $H_Г = (Z_{2A} – Z_1)$ = 202,65 – 187,46 = 15,19 м. Загальні втрати напору на лінії 1А складають Σh_w=3,81 м, причому з них втрати напору на в'язке тертя по довжині ділянки 1А довжиною l_{1A}=87 м складають $h_{l,1A}$=0,181 м, а втрати напору на місцевих опорах – $\Sigma h_{м,1A}$=3,63 м, з них 1,429 м – це втрати напору у водорозподільній системі градирні і вільний напір на виході з розбризкувачів. Отже, втрати напору по довжині складають у приведеному прикладі біля ™l=1 % від загального напору, що створюється насосом.

Подібна ситуація має місце для всіх трубопроводів системи. Тому, незважаючи на те, що основну довжину гідравлічного тракту розглянутої СЦВ складають напірні закриті трубопроводи, при її моделюванні можна допускати певну непропорційність сил в'язкого тертя в натурі і на моделі.

Деяке перевищення коефіцієнта гідравлічного тертя на моделі λ_M над натурним коефіцієнтом λ_H не має принципового значення, його можна компенсувати відповідним зменшенням на моделі коефіцієнтів місцевих опорів. Більше того, точність визначення коефіцієнта (того чи іншого місцевого гідравлічного опору навіть у квадратичній зоні опору не перевищує 5...10 %. Таким чином, помилка у втратах напору по довжині завжди буде лежати в межах похибки визначення коефіцієнтів місцевого опору.

Звідси можна зробити наступні висновки:

Подібність за числом Рейнольдса *(Saldana et all, 2024; Pfister et all,* 2011) не є визначальною при моделюванні розглянутої СЦВ.

В той же час число Рейнольдса (*Heller, 2017*) на моделі обов'язково повинне відповідати турбулентному режиму руху (Re>2300).

У трубопроводах системи не обов'язково повинна мати місце зона квадратичного опору за λ, значно важливіше у всіх трубопроводах досягти автомодельного значення місцевих опорів. Для більшості місцевих опорів автомодельність за числом Рейнольдса настає вже при Re>10000 (*Kalenik, 2020*).

З огляду на складність гідродинамічних явищ, що відбуваються в місцевих опорах, доцільно поряд з їхнім розрахунком за загальноприйнятими формулами застосовувати метод експериментального визначення коефіцієнтів місцевих опорів з наступним наближенням їх до необхідних значень (*Murzyn et all, 2008; Fester et all, 2007)*.

ПОДІБНІСТЬ СПІВВІДНОШЕННЯ ПЛОЩ І ОБ'ЄМІВ

Основною перевагою створення повністю геометрично подібної моделі без спотворення вертикального масштабу є те, що при цьому автоматично досягається подібність співвідношення відповідних площ і об'ємів у натурі та на моделі, що є дуже важливим при моделюванні перехідних явищ у СЦВ закритого типу.

ПОДІБНІСТЬ КОЕФІЦІЄНТІВ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ

Однією з найбільш очевидних гідравлічних умов подібності є рівність приведених коефіцієнтів гідравлічного опору $\zeta_{пр}$ у натурі та на моделі. Це випливає з наступних міркувань. Загальні втрати напору на ділянці трубопроводу однакового діаметра визначаються через об'ємну витрату рідини на ділянці за формулою:

$$\sum h_w = \frac{8Q^2}{\pi^2 g d^4}\cdot\left(\frac{\lambda l}{d}+\sum\zeta\right)=\frac{8\zeta_{пр}Q^2}{\pi^2 g d^4}$$

$$\Sigma h_w = \frac{8Q^2}{\pi^2 g d^4}\cdot\left(\frac{\lambda l}{d}+\Sigma\zeta\right)=\frac{8\zeta_{пр}Q^2}{\pi^2 g d^4} \quad (1)$$

де $\zeta_{пр}$ = (⌊l/d +Σ(– приведений коефіцієнт гідравлічного опору на ділянці.

Оскільки для забезпечення подібності за критерієм Фруда (*Heller, 2011*) при лінійному масштабі моделі C_L масштаб об'ємної витрати становить $C_L^{2,5}$, а масштаб втрат напору, так само як масштаб висот чи напорів, має бути рівним геометричному масштабу C_L, то отримаємо:

$$C_L = C_{\zeta} \oplus C_Q^2 / C_L^4 = C_{\zeta} \oplus C_L, \quad (2)$$

звідки C_{ζ}=1, тобто $(\zeta_{пр})_н = (\zeta_{пр})_м$.

Як правило, при моделюванні стаціонарного руху в напірних водогонах намагаються досягти рівності ⌊н=⌊м. Як видно з (*Cortinovis et all, 2009*), ця умова може вважатися обов'язковою для довгих трубопроводів, коли втрати напору по довжині значно переважають місцеві втрати напору (*Wolfert, 2008*).

Якщо потік в натурі є турбулентним і для нього має місце квадратична зона опорів, то для стійкого дотримання рівності коефіцієнтів гідравлічного тертя в натурі та на моделі найпростіше забезпечити на моделі також квадратичну зону опорів, а абсолютну шорсткість модельних труб прийняти з умови рівності відносної шорсткості натурних і модельних труб.

Згідно з класифікацією Альтшуля, автомодельна зона опорів у трубопроводі має місце при Re>⊗e/d>500, тому для забезпечення на моделі квадратичної зони опорів число Рейнольдса має бути не меншим

$$\mathrm{Re}_м = \frac{500\cdot d_м}{\Delta_м} \quad (3)$$

Визначимо максимально можливий геометричний масштаб моделі СЦВ для забезпечення на ній автомодельності ⌊ за числом Рейнольдса. При однаковій витраті рідини число

Рейнольдса, а відтак і співвідношення Re⊕⊗е/d, буде найменшим для труб максимального діаметра. Тому розглянемо, для прикладу, трубопровід діаметром $D_н$=3416 мм. При стаціонарному режимі роботи системи і всіх працюючих насосах число Рейнольдса для зливних трубопроводів від градирень до приймальної камери БНС становить $Re_н$=9151000. При розрахунковій еквівалентній шорсткості натурних труб ⊗н=0,5 мм: $Re_н$⊕⊗н/$D_н$ = 1339,4. Отже, в натурних умовах у трубах має місце квадратична зона опорів.

З врахуванням того, що число Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{4 \cdot \mathrm{Q}}{\pi \mathrm{d} \nu} \tag{4}$$

а масштаб об'ємної витрати при моделюванні за Фрудом $C_Q=C_L^{2,5}$, то числа Рейнольдса в натурі та на моделі співвідносяться як

$$\frac{\mathrm{Re_н}}{\mathrm{Re_м}} = \frac{\mathrm{C_L^{2,5}}}{\mathrm{C_L}} = \mathrm{C_L^{3/2}}. \tag{5}$$

Якщо на моделі дотримано подібність по відносній шорсткості:

$$C_L = \frac{d_н}{d_м} = \frac{\Delta_н}{\Delta_м}, \tag{6}$$

то для забезпечення на моделі квадратичної зони опорів має виконуватися умова:

$$\mathrm{Re_м}\frac{\Delta_м}{d_м} = \frac{1}{\mathrm{C_L^{3/2}}}\mathrm{Re_н}\frac{\Delta_н}{d_н} > 500 \tag{7}$$

Отже, для наведеного вище випадку при моделюванні гідравлічних явищ за числом Фруда для забезпечення на моделі квадратичної зони опорів геометричний масштаб має бути

$$C_L < \left(\frac{1339{,}4}{500}\right)^{2/3} = 1{,}929 \tag{8}$$

що абсолютно нереально з економічних міркувань.

З іншого боку, для того, щоб забезпечити на моделі бодай доквадратичну зону опорів (10<Re⊕⊗е/d<500), максимально допустимий геометричний масштаб має становити

$$C_L < \left(\frac{1339{,}4}{10}\right)^{2/3} = 26{,}18. \tag{9}$$

Розглянемо, яка похибка за ⌊м буде в даному випадку при доквадратичній зоні опорів, тобто при 10< ($Re_м$⊕⊗м/$d_м$) <500.

В той час, як коефіцієнт гідравлічного тертя для натурних труб визначається за формулою Шифрінсона

$$⌊_н = 0{,}11⊕(⊗_м/D_н)0{,}25 \tag{10}$$

на модельних трубах матиме місце доквадратична зона опорів і коефіцієнт гідравлічного тертя буде дещо більшим і визначатиметься за степеневою формулою Альтшуля:

$$⌊_м = 0{,}11⊕(⊗_м/d_м + 68/Re_м)0{,}25 \tag{11}$$

Відношення коефіцієнта гідравлічного тертя на моделі до відповідного значення в натурі

$$k = \frac{\lambda_м}{\lambda_н} = \left(1 + \frac{68 d_м}{\mathrm{Re_м}\Delta_м}\right)^{0{,}25} \tag{12}$$

На нижній межі зони доквадратичного опору (при $Re_м$⊕⊗м/$d_м$=10): k =(1+6,8)·0,25= 1,671, тобто перевищення модельного коефіцієнта гідравлічного тертя над натурним становить 67,1 %.

Вже при лінійному масштабі C_L>2 дотримання рівності коефіцієнтів гідравлічного тертя в натурі та на моделі стає неможливим внаслідок виходу із зони квадратичного опору в зону доквадратичного опору, де коефіцієнт гідравлічного тертя тим більший, чим менше число Рейнольдса Re.

Так, при C_L=10 $Re_м$⊕⊗м/$d_м$ =42,35; k=1,271. При C_L=20 $Re_м$⊕⊗м/$d_м$ =14,98; k=1,534.

ОСНОВНІ ВИРІШЕННЯ

Особливість конструювання фізичної моделі конденсаторів полягає у тому, що моделювалися лише основні їхні параметри, принципові з точки зору гідравлічних явищ: загальний об'єм води в трубках конденсаторів; відмітки верху та низу конденсаторів; співвідношення об'єму води, який може повертатися при зупинці насосів назад у приймальний резервуар БНС-3, і який не повертається назад (для цього у проекті моделі конденсаторів передбачено два різних типи баків за розмірами). Для випуску повітря з конденсаторів у їх верхніх точках передбачено кульові вентилі d=1/2". Для зміни величини гідравлічного опору конденсаторів передбачено встановлення регулювальних кульових вентилів d=1".

Конструкція приймальних резервуарів насосних станцій розроблялася з врахуванням конструктивних параметрів вибраного насосного обладнання фізичної моделі. Основні геометричні розміри аванкамер, розташування місць приєднання зливних трубопроводів та труб перетоку повністю відповідають натурним з врахуванням вибраного геометричного масштабу.

Водозбірні чаші градирень моделювалися у повній відповідності до проекту натурних градирень. Розподільна система градирень

моделювалася принципово, з дотриманням потрібного об'єму води та висоти розташування виливних насадок.

Висновки

Основними визначальними умовами, яких слід дотримуватися при моделюванні розгляднутої СЦВ закритого типу, є максимальне дотримання геометричного масштабу для всіх елементів фізичної моделі. При цьому вертикальний масштаб повинен бути рівний горизонтальному лінійному масштабу. По-перше, це значно підвищує точність відтворення фізичної моделі, дозволяє уникнути складного і часто досить умовного перерахунку результатів з моделі на натурну систему. З іншого боку, наявність вертикального спотворення унеможливлює з технічної точки зору адекватне моделювання руху води в трубопроводах системи. Оскільки діаметр труб є досить значним у порівнянні із загальним напором насосів, то виникає не обхідність деформування поперечних перерізів труб з круглих у еліпсоподібні. Це порушить аналогію гідравлічних процесів (відношення гідравлічних радіусів у натурі та на моделі не дорівнює прийнятим лінійним масштабам, а буде чимось середнім між горизонтальним та вертикальним масштабом), а також надзвичайно ускладнить технічну реалізацію модельної установки.

Просте дотримання єдиного лінійного масштабу моделі забезпечить пропорційність у натурі та на моделі всіх відповідних площ живого перерізу труб та площ вільної поверхні води в ємнісних спорудах СЦВ, пропорційність геометричних висот та усіх відповідних об'єктів.

Як правило, гідравлічне моделювання трубопровідних систем пов'язують з рівністю відповідних чисел Рейнольдса. Слід зазначити, що розглядувана СЦВ закритого типу є складною гідравлічною системою з напірними і самопливними ділянками, з розривом струменя на градирнях і т.п. Аналіз показав, що подібність гідравлічних явищ у натурі та модельній СЦВ не пов'язана з рівністю відповідних чисел Рейнольдса. Це пояснюється наступними обставинами.

В натурній СЦВ практично у всіх трубах системи має місце чітко виражена квадратична зона опорів, і коефіцієнт гідравлічного тертя не залежить від зміни числа Рейнольдса.

Незважаючи на те, що система є закритого типу, у ній переважають не сили тертя, а сили тяжіння. Так, основна частина напору насосів іде на підйом води на певну геометричну висоту, а не на подолання гідравлічних опорів.

Для більшості ділянок трубопроводів натурної СЦВ кількісно переважають втрати напору на місцевих опорах. Автомодельність коефіцієнта місцевого опору за числом Рейнольдса наступає, як правило, вже при Re>5000…10000. Тому, при забезпеченні відповідних чисел Рейнольдса на моделі гідравлічний опір трубопроводу вже практично не залежать від числа Re, а більше залежить від геометричних характеристик місцевих опорів.

Аналіз співвідношення сил, які діють в натурній системі, дає підставу стверджувати, що динамічна подібність гідравлічних явищ у системі забезпечується рівністю у натурі та на моделі критерію Фруда Fr.

Рівність критеріїв Фруда для відповідних перерізів при дотриманні повної геометричної подібності забезпечить повну динамічну подібність при рівності коефіцієнтів гідравлічного опору.

Незважаючи на принципову неможливість дотримання рівності натурного та модельного коефіцієнтів гідравлічного тертя λ при лінійному масштабі C_L>2, ця умова не є диктуючою, оскільки основну частку в приведених коефіцієнтах опору становлять коефіцієнти місцевого опору. Таким чином, регулюючи коефіцієнти місцевих опорів модельної установки, можна досягти рівності приведених гідравлічних опорів у натурі та на моделі.

Моделювання за числом Фруда при дотриманні повної геометричної подібності дозволяє застосувати досить великий коефіцієнт C_L без порушення подібності гідродинамічних процесів, у тому числі і перехідних. Таким чином, можна адекватно моделювати стаціонарні та перехідні процеси в СЦВ закритого типу при C_L=55…75, доки ще дотримується умова автомодельності коефіцієнтів місцевого опору від числа Рейнольдса. Це дозволить істотно зменшити капітальні затрати на створення фізичної моделі, а також експлуатаційні затрати при її використанні.

Література

[1] Chanson, H. (2004). "Environmental Hydraulics of Open Channel Flows." Elsevier Butterworth-Heinemann, London, UK, 483 pages

[2] Cortinovis, G. F., Paiva, J. L., Song, T. W., & Pinto, J. M. (2009). A systemic approach for optimal cooling tower operation. Energy Conversion and Management, 50(9), 2200-2209.

[3] Fester, V., Kazadi, D., Mbiya, B., Slatter, P. (2007) Loss Coefficients for Flow of Newtonian and Non-Newtonian Fluids Through Diaphragm Valves, Chemical Engineering Research and Design, Volume 85, Issue 9, , https://doi.org/10.1205/cherd06055

[4] Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. Journal of Hydraulic Research, 49(3), 293-306. https://doi.org/10.1080/00221686.2011.578914.

[5] Heller, V. (2017). Self-similarity and Reynolds number invariance in Froude modelling. Journal of Hydraulic Research, 55(3), 293-309. https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1250832.

[6] Hughes, S. (1993). Physical models and laboratory techniques in coastal engineering (Vol. 7). World scientific.

[7] Kalenik, M. (2020). Real Values of Local Resistance Coefficients during Water Flow in Welded Polypropylene T-junctions. Water, 12(3), 895. https://doi.org/10.3390/w12030895

[8] Li, S., Huai, W. (2016). United Formula for the Friction Factor in the Turbulent Region of Pipe Flow. PLOS ONE. 11.

[9] Murzyn, F., & Chanson, H. (2008). *Experimental assessment of scale effects affecting two-phase flow properties in*

hydraulic jumps. Experiments in Fluids, 45(3), 513–521. https://doi.org/10.1007/s00348-008-0494-4

[10] Pfister, M., Hubert. C., (2012). Scale effects in physical hydraulic engineering models By VALENTIN HELLER, Journal of Hydraulic Research, Vol. 49, No. 3 (2011), pp. 293–306. Journal of Hydraulic Research. 50.

[11] Saldana, M., Gallegos, S., Gálvez, E., Castillo, J., Salinas-Rodríguez, E., Cerecedo-Sáenz, E., Hernández-Ávila, J., Navarra, A., & Toro, N. (2024). The Reynolds Number: A Journey from Its Origin to Modern Applications. *Fluids*, *9*(12), 299. https://doi.org/10.3390/fluids9120299 https://doi.org/10.1080/00221686.2012.654671.

[12] Windt, Christian & Davidson, Josh & Ringwood, John. (2021). Numerical analysis of the hydrodynamic scaling effects for the Wavestar wave energy converter. Journal of Fluids and Structures. 105. 103328. 10.1016/j.jfluidstructs.2021.103328.

[13] Wolfert, K. (2008) «Scaling of Thermal-Hydraulic Phenomena and System Code Assessment». Seminar on the transfer of competence, knowledge and experience gained through CSNI activities in the field of thermal-hydraulics, c. p. 135–154.

[14] Chanson, H. (2004). "Environmental Hydraulics of Open Channel Flows." Elsevier Butterworth-Heinemann, London, UK, 483 pages

[15] Cortinovis, G. F., Paiva, J. L., Song, T. W., & Pinto, J. M. (2009). A systemic approach for optimal cooling tower operation. Energy Conversion and Management, 50(9), 2200-2209. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.04.008.

[16] Fester, V., Kazadi, D., Mbiya, B., Slatter, P. (2007) Loss Coefficients for Flow of Newtonian and Non-Newtonian Fluids Through Diaphragm Valves, Chemical Engineering Research and Design, Volume 85, Issue 9, , https://doi.org/10.1205/cherd06055

[17] Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. Journal of Hydraulic Research, 49(3), 293-306. https://doi.org/10.1080/00221686.2011.578914.

[18] Heller, V. (2017). Self-similarity and Reynolds number invariance in Froude modelling. Journal of Hydraulic Research, 55(3), 293-309. https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1250832.

[19] Hughes, S. (1993). Physical models and laboratory techniques in coastal engineering (Vol. 7). World scientific.

[20] Kalenik, M. (2020). Real Values of Local Resistance Coefficients during Water Flow in Welded Polypropylene T-junctions. Water, 12(3), 895. https://doi.org/10.3390/w12030895

[21] Li, S., Huai, W. (2016). United Formula for the Friction Factor in the Turbulent Region of Pipe Flow. PLOS ONE. 11.

[22] Murzyn, F., & Chanson, H. (2008). *Experimental assessment of scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jumps.* Experiments in Fluids, 45(3), 513–521. https://doi.org/10.1007/s00348-008-0494-4

[23] Pfister, M., Hubert. C., (2012). Scale effects in physical hydraulic engineering models By VALENTIN HELLER, Journal of Hydraulic Research, Vol. 49, No. 3 (2011), pp. 293–306. Journal of Hydraulic Research. 50.

[24] Saldana, M., Gallegos, S., Gálvez, E., Castillo, J., Salinas-Rodríguez, E., Cerecedo-Sáenz, E., Hernández-Ávila, J., Navarra, A., & Toro, N. (2024). The Reynolds Number: A Journey from Its Origin to Modern Applications. *Fluids*, *9*(12), 299. https://doi.org/10.3390/fluids9120299https://doi.org/10.1080/00221686.2012.654671.

[25] Windt, Christian & Davidson, Josh & Ringwood, John. (2021). Numerical analysis of the hydrodynamic scaling effects for the Wavestar wave energy converter. Journal of Fluids and Structures. 105. 103328. 10.1016/j.jfluidstructs.2021.103328.

[26] Wolfert, K. (2008) «Scaling of Thermal-Hydraulic Phenomena and System Code Assessment». Seminar on the transfer of competence, knowledge and experience gained through CSNI activities in the field of thermal-hydraulics, c. p. 135–154.

Удосконалення розрахунку параметрів дренажу з урахуванням глибокого розпушення ґрунту

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.015

Євген Ромащенко
Національний університет водного господарства та інженерії природокористування,
м. Рівне, Україна
e.v.romashchenko@nuwm.edu.ua

Павло Волк
Національний університет водного господарства та інженерії природокористування,
м. Рівне, Україна
p.p.volk@nuwm.edu.ua

Олександр Онопко
Національний університет водного господарства та інженерії природокористування,
м. Рівне, Україна
o.s.onopko@nuwm.edu.ua

Анатолій Рокочинський
Національний університет водного господарства та інженерії природокористування,
м. Рівне, Україна
a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua

Анотація — **визначено технологічні та конструктивні параметри спільної роботи дренажу з різними технологіями глибокого розпушення, за якими удосконалено методи їх розрахунку шляхом поєднання гідромеханічного й водобалансового методів: відповідно удосконалено розрахункову двошарову схему та визначено середньозважені за профілем та площею розповсюдження значення показників водно-фізичних властивостей (коефіцієнти фільтрації й водовіддачі тощо), глибини залягання водоупору на осушуваному масиві, а також гідрологічні характеристики впливу на умови роботи дренажу, що дасть змогу, на відміну від наявних, підвищити точність й обґрунтованість відповідних проектних рішень на 20...30%.**

Ключові слова — параметри дренажу, глибоке розпущення.

I. ВСТУП

У зв’язку з несприятливими водно-фізичними властивостями, насамперед підорних горизонтів осушуваних дерново-підзолистих ґрунтів Західного Полісся, що негативно впливає на їх вологозабезпеченість й, відповідно, родючість, а також неоднозначним впливом осушення на ґрунтові процеси в них, при їх освоєнні та використанні рекомендується одночасно з улаштуванням дренажу проводити низку агромеліоративних заходів, спрямованих на збільшення акумуляційної здатності активного шару ґрунту, покращання поверхневого і внутрішньогрунтового стоку, збагачення ґрунту поживними елементами, підтримання сприятливого еколого-меліоративного стану осушуваних ґрунтів. Найбільш ефективним з таких заходів для переважаючих в даному регіоні дерново-підзолистих ґрунтів є їх глибоке розпушення у поєднанні з дренажем Вплив глибокого розпушення на ефективність роботи систематичного матеріального дренажу на мінеральних осушуваних ґрунтах призводить насамперед до прискорення відведення зайвої вологи та посилення дренованості осушуваної території у періоди перезволоження. Під періодами перезволоження слід сьогодні розуміти не тільки традиційний для обґрунтування параметрів дренажу весняний розрахунковий період, але й критичні періоди, що виникають впродовж періоду вегетації внаслідок часто локального випадіння інтенсивних атмосферних опадів (зливового характеру), пов’язаних зі змінами клімату, і призводить до значного підвищення навантаження на роботу дренажу [1-6]. При цьому залежно від виду та технологій глибокого розпушення можлива часткова акумуляція вологи в підорному шарі розпушеного ґрунту, що може частково знижувати навантаження на дренаж.

II. МЕТОДИ ТА МАТЕРІАЛИ

У загальному випадку, для розрахунку параметрів дренажу (відстані між дренами), згідно ДБН В.2.4-1-99, рекомендовано використовувати загальноприйняту формулу з урахуванням розробок О. Я. Олійника та О. І. Мурашко для однорідних і шаруватих ґрунтів в умовах атмосферно-ґрунтового живлення [3], оскільки вона досить повно враховує конструктивні особливості горизонтального дренажу і реалізується за такими розрахунковими схемами щодо різної шаруватості ґрунтів та їх водопроникності за сталої відстані від поверхні ґрунту до водо упору.

Проведення глибокого розпушення на мінеральних осушуваних ґрунтах призводить до змін водно-фізичних властивостей ґрунту і, відповідно, його водопроникності та акумулятивної здатності, що визначає необхідність внесення змін в розрахунок дренажу з урахуванням застосування різних технологій розпушення. Ці зміни дають змогу виділити два водопровідних пласти ґрунту з вираженими характерними особливостями. Верхній пласт має підвищену штучну водопровідність, що

надана йому за рахунок першого верхнього орного шару ґрунту потужністю (m_1) з відповідним коефіцієнтом фільтрації K_1, розпушеного другого шару ґрунту за відповідною технологією глибокого розпушення (щільове, смугове, суцільне) (m_2), K_2 та третього шару до глибини влаштування дренажних траншей (m_3), K_3 що за своїми характеристиками аналогічний смуговому глибокому розпушенню ґрунту). А нижній пласт характеризується природною водопровідністю K_4 з можливою структурною його шаруватістю та різною глибиною залягання водоупору (m_{Dn})[148].

Тому, на підставі та в розвиток розробок Олійника О. Я [155,156], Полякова В. Л.[3,7], Кожушка Л. Ф. [3], та, що стосується визначення параметрів дренажу, в тому числі з урахуванням глибокого розпушення, нами розроблено і пропонується, на відміну від наявних розрахункових різних багатошарових схем, універсальну двошарову схему роботи дренажу при глибокому розпушенні ґрунту за відповідною технологією та різною глибиною залягання водоупору (рис. 1.)

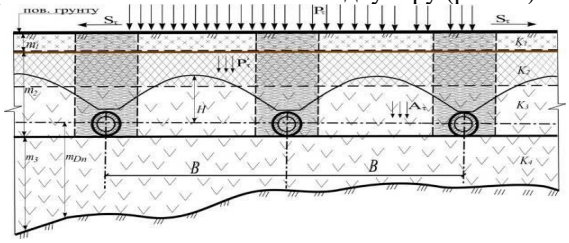


Рис. 1.Розрахункова схема роботи дренажу при наявності глибокого розпушення ґрунту : K_1, K_2, K_3, K_4 – коефіцієнти фільтрації, *м/добу*; P_τ – максимальна кількість опадів, що випала за добу, *мм*; S_τ – поверхневий стік за час τ, P'_τ – частина опадів добового максимуму опадів, що попадає в розпушений грунт, *мм*; A_τ – акумулююча здатність розпушеного ґрунту в зоні аерації, залежно від вихідної вологості, *мм.*

Відповідно до запропонованої розрахункової схеми роботи дренажу при глибокому розпушенні ґрунту (див. рис. 1), середньозважені за профілем та площею розповсюдження значення відповідних показників $\overline{X}_i$ щодо водно-фізичних властивостей (коефіцієнт фільтрації, коефіцієнт водовіддачі тощо) для визначеної кількості водопровідних пластів та шарів ґрунту, у межах виділених характерних за рельєфом ділянках осушуваного масиву, можна визначити аналогічно до лінійно-площинного підходу (Коптюк Р.М., 2013), який у загальному випадку має вигляд

$$\overline{X}_i = \sum_{i=1}^{n}\left(X_i \cdot m_i \cdot f_i\right) \Big/ \sum_{i=1}^{n}\left(m_i \cdot f_i\right) \quad i=\overline{1,n}, \qquad (1)$$

де X_i – відповідні значення показників водно-фізичних властивостей ґрунтів щодо коефіцієнту фільтрації K_i, коефіцієнту водовіддачі μ_i тощо для відповідних водопроникних шарів як верхнього пласту з підвищеною штучною водопроникністю (оранка верхнього шару, розпушення другого шару, глибина дренажних траншей), так і нижнього пласту з природною водопроникністю, який може бути однорідним або шаруватим; m_i – відповідні потужності шарів ґрунту, f_i – дольові частки займаної площі відповідних шарів ґрунту у межах виділеної характерної ділянки території за рельєфними умовами.

Вплив різних технологій глибокого розпушення на водопроникність осушуваних мінеральних ґрунтів характеризується різним рівнем зміни їх фільтраційної та акумуляційної здатності. Залежність коефіцієнту фільтрації K_i при застосуванні різних технологій глибокого розпушення від коефіцієнту повноти розпушеності R_c в шарі ґрунту 0,6 м може бути визначене за такою емпіричною залежністю (Рокочинський А. М., Ткачук Ф. В., Степанюк А. А. та ін. 2006),

$$K_i = 1{,}60 - \frac{0{,}117}{R_c},\ {}^{м}\!/_{добу}\ ;\ 0{,}1 \le R_c \le 0{,}7. \qquad (2)$$

Відповідно, залежність максимального запасу продуктивної вологи ґрунту $Wh°$ від коефіцієнту повноти розпушеності R_c в шарі ґрунту 0,6 м визначається за формулою

$$Wh° = \frac{R_c}{0{,}0003 + 0{,}0014 \cdot R_c}\ ,м^3/га\ ;$$

$$0{,}1 \le R_c \le 0{,}7. \qquad (3)$$

Акумулююча здатність розпушеного ґрунту A_τ ($м^3/га$) щодо кількість акумульованої води в разі випадіння опадів, залежно від їх ефективної кількості P_e (*мм*) за виключенням поверхневого стоку, та максимального запасу продуктивної вологи ґрунту $Wh°$ ($м^3/га$), може бути визначена за такою емпіричною залежністю

$$A_\tau = 0{,}0214\frac{P_e^{\,2}}{Wh°}\ ,м^3/га\cdot \qquad (4)$$

Відповідно середньозважене розрахункове значення відстань від осі дрени до водоупору $\overline{m_{Dn}}$ при можливому його змінному характері у межах характерної ділянки території за рельєфними умовами можна визначити за формулою

$$\overline{m_{Dn}} = \sum_{i=1}^{n}\left(m_{Dn_i} \cdot f_i\right) \Big/ \sum_{i=1}^{n} f_i\ ,\ i=\overline{1,n}, \qquad (15)$$

де m_{Dn_i} – змінна відстань від осі дрени до водоупору у межах характерної ділянки території за рельєфними умовами; f_i – дольова частка займаної площі розповсюдження однакової відстані від осі дрени до водоупору в межах характерної ділянки території за рельєфними умовами.

Час, за який може бути знижений РГВ до безпечного рівня щодо затоплення та підтоплення вирощуваних культур або тривалість періоду, в

продовж якого формується модуль дренажного стоку, що значно перевищує його розрахункове значення і характеризує граничні умови роботи дренажу, визначається за виразом

$$t = \frac{P'_\tau}{86{,}4 \cdot q_i}\ , діб, \qquad (6)$$

де q_i – розрахунковий модуль дренажного стоку, *м/добу*.

Частина опадів (добових, декадних тощо), що попадає в грунт і формує підняття РГВ та збільшення модуля дренажного стоку (інфільтрація), може бути визначена згідно розрахункової схеми (див. рис. 1), за виразом

$$P'_\tau = P_\tau - S_\tau - A_\tau\ , мм, \qquad (7)$$

де P_τ – максимальна кількість опадів, що випала за добу, *мм*; S_τ – поверхневий стік за час τ, який визначається за аналогією з формулою А. М. Янголя як

$$S_\tau = P_\tau \cdot k_s\ , мм\ , \qquad (8)$$

де k_s – коефіцієнт поверхневого стоку.

Тут коефіцієнт поверхневого стоку (k_s) може бути визначений за емпіричною формулою, яка розглядає залежність його утворення на меліорованих територіях від двох визначальних факторів: водопроникності ґрунту, що характеризується коефіцієнтом фільтрації (K_i), та ухилом його поверхні (i)

$$k_s = \left(1 - 0{,}07 \cdot \frac{K_i}{K_{i_0}}\right) \cdot i^{0{,}17\left(1+\frac{K_i}{K_{i_0}}\right)} \qquad (9)$$

де K_{i_0} – оптимальний коефіцієнт фільтрації за умовами водорегулювання, K_{i_0} =1,0 м/добу.

ІІІ.РЕЗУЛЬТАТИ

Узагальнені результати дослідження спільної дії дренажу та різних технологій глибокого розпушення щодо не розпушеного осушуваного мінерального ґрунту у критичних умовах при випадінні добових максимумів опадів різної забезпеченості на прикладі досліджуваного об'єкта наведено в табл. 1.

Отримані результати засвідчують, що в досліджуваних умовах глибоке суцільне розпушення ґрунту впливає на ефективність роботи дренажу, при цьому швидкість відведення води змінюється від 35% до 5% при забезпеченості опадів від 5% до 90%, що є значно ефективніше ніж при щілинному та смуговому розпушенні, за рахунок відповідного зменшення величини поверхневого стоку, збільшення заакумульованої води в ґрунті та зменшення кількості води, що надходить в дренаж.

Таким чином, глибоке розпушення ефективно впливає на роботу дренажу, сприяє більш швидкому звільненню орного шару ґрунту від надлишку вологи, прискорюючи її переміщення та акумуляцію у нижче розташованих шарах, тим самим зменшує навантаження на дренаж.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року: затв. розпорядженням КМУ від 14 серпня 2019 р. №688-р.

[2] Рокочинський А.М., Волк П.П. Моделі системної оптимізації для створення й функціонування дренажних систем у сучасних умовах. Меліорація і водне господарство № 1 (2021). С.-75-86.

[3] Меліорація та облаштування Українського Полісся: колективна монографія / за ред. д.с-г.н., професора, акад. НААН Я.М. Гадзала, д.т.н., професора, член-кор. НААН В.А. Сташука, д.т.н., професора А.М. Рокочинського. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. Т.1. 932 с.

[4] Рокочинський А.М. Наукові та практичні аспекти оптимізації водо регулювання осушуваних земель на елоколого–економічних засадах: Монографія/ За редакцією академіка УААН. Ромащенка М.І.– Рівне: НУВГП, 2010–351с.

[5] Янголь А.М. Двустороннее регулирование влажности при осушении. - М.: Колос, 1970. – 135 с.

[6] . Науково-методичні рекомендації щодо створення та функціонування дренажних систем у змінних сучасних умовах / Сташук В.А, Рокочинський А.М., Волк П.П., та ін – Рівне: НУВГП, 2021. – 104 с.

[7] Rokochinskiy, A., Kuzmych, L., & Volk, P. (Eds.). (2023). Handbook of Research on Improving the Natural and Ecological Conditions of the Polesie Zone. IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8248-3.

[8] Волк П. П., Рокочинський А. М., Тимейчук О. Ю. Теоретичні аспекти системної оптимізації створення та функціонування дренажних систем на еколого-економічних засадах. Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2020. Вип. 3 (90). С. 3–21.

.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика гідрологічних та технологічних складових спільної роботи дренажу та різних технологіях розпушення щодо не розпушеного ґрунту у критичних умовах, %

Значення показників	Розрахункова забезпеченість добових максимумів опадів						
	P ,%	5%	10%	30%	50%	70%	90%
	P_τ ,мм	89,0	73,0	49,0	42,0	31,0	21,0
Щілинне K_i =0,25 *м/добу*; Wh° = 594 *м³/га*;	ΔS_τ ,%	14,95	14,93	14,95	14,95	15,03	14,87
	ΔA_τ ,%	38,87	29,65	29,62	29,66	29,75	30,56
	$\Delta P'_\tau$,%	2,26	0,67	2,44	2,90	3,64	4,22
	Δt ,%	7,88	0,96	3,08	3,70	4,42	5,56
Смугове K_i =0,36 *м/добу*; Wh° =655 *м³/га*;	ΔS_τ ,%	25,84	25,85	25,84	25,78	25,94	25,81
	ΔA_τ ,%	99,34	86,09	86,08	86,21	84,18	87,50
	$\Delta P'_\tau$,%	11,25	5,65	0,09	1,40	-3,64	5,59
	Δt ,%	20,05	8,04	0,51	1,85	4,42	6,94
Суцільне K_i =0,53 *м/добу*; Wh° =711 *м³/га*;	ΔS_τ ,%	39,99	40,01	40,03	40,02	40,61	39,96
	ΔA_τ ,%	180,9	162,2	162,2	162,4	162,0	163,8
	$\Delta P'_\tau$,%	23,64	14,42	3,75	0,86	3,50	7,22
	Δt ,%	35,56	19,94	5,13	7,41	4,42	5,56

MCIT
Modeling, control & information technologies

Техніко-економічне обґрунтування допустимих рівнів надійності для гідромеліоративних споруд

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.016

Людмила Токар
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
l.o.tokar@nuwm.edu.ua

Ілона Панасюк
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
panasiuk_vg23@nuwm.edu.ua

Анотація – **Проведено аналіз класифікації гідромеліоративних гідротехнічних споруд за двома ключовими критеріями: класом капітальності та класом наслідків (відповідальності). Запропоновано значення допустимих рівнів надійності для гідромеліоративних споруд залежно від класу капітальності та класів наслідків (відповідальності).**

Ключові слова — гідромеліоративна система, гідротехнічна споруда, клас споруди, коефіцієнт надійності, рівень надійності.

Процес проєктування гідромеліоративної системи охоплює вибір структурної схеми, кількісного складу елементів, конструктивних рішень, будівельних технологій і експлуатаційних принципів. Ключовим завданням проєктування є забезпечення необхідного рівня надійності, оскільки його відсутність унеможливлює ефективну експлуатацію системи.

При розробці технічних систем, зокрема гідромеліоративних, критерії економічної ефективності, надійності та якості доцільно представляти у вигляді системи цільових функцій [1]

$$\left.\begin{aligned} &ПЗ = E_H K + C_E \to \min; \\ &P(t) \ge P_{Д\min}; \\ &П_Я \ge П_{Я\min}, \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

де перший вираз системи – загальні приведені затрати; другий – характеризує надійність об'єктів; третій – якість об'єкта;

E_H - нормативний коефіцієнт порівнювальної економічної ефективності; K - капіталовкладення на будівництво об'єкта; C_E - приведені річні експлуатаційні затрати для порівнювального варіанта; $P(t)$ - показник надійності об'єкта; $P_{Д\min}$ - мінімальний допустимий показник надійності об'єкта (системи) який забезпечує його окупність протягом нормативного строку T_H. $П_Я$ - показник якості об'єкта; $П_{Я\min}$ - допустимий мінімальний показник якості, який забезпечує ефективне використання об'єкта (системи).

Виконання умови $P(t) \ge P_{Д\min}$ часто досягається через резервування елементів, що, однак, збільшує капітальні вкладення та експлуатаційні витрати на профілактичне обслуговування резервних агрегатів. З огляду на це, при оцінюванні ефективності об'єктів важливо привести всі затрати до рівноцінних обсягів роботи. Якщо корисні результати варіантів ідентичні, то різниця в їхній ефективності зводиться виключно до відмінностей у затратах, необхідних для виконання заданої роботи.

Зважаючи на ймовірнісний характер порівнюваних обсягів робіт, для визначення прямих затрат доцільно застосовувати відповідний вираз [1]:

$$\frac{1}{K_{ПР}}\left(E_H K + C_E\right) \to \min \quad (2)$$

де $K_{ПР}$ - коефіцієнт зведення обсягів робіт до імовірнісних обсягів:

$$K_{ПР} = A \cdot P(t) \quad (3)$$

де A – обсяг робіт імовірність отримання якого $P(t)$

Співвідношення (2) є показником фізичного мінімуму, що демонструє пошук найекономічнішого рішення за критерієм затрат відносно інших порівнюваних варіантів.

На сучасному етапі проєктування гідромеліоративних систем здійснюється переважно

на основі детерміністичних моделей, які враховують практичний накопичений досвід через застосування коефіцієнтів запасу. При цьому чинні норми не встановлюють кількісних критеріїв надійності для об'єктів чи систем. Відповідно до норм [2], надійність споруд корелюється з їхнім класом капітальності, який, своєю чергою, залежить від площі, що обслуговується.

Класифікація гідротехнічних споруд за класами наслідків (відповідальності) ґрунтується на оцінці їхньої соціально-економічної відповідальності та масштабу ймовірних гідродинамічних аварій.

Відповідно до класу наслідків (відповідальності) споруд, категорії відповідальності конструкції та її елементів і групи граничних станів призначаються відповідні значення коефіцієнтів надійності [3,4].

Як видно з умови граничного стану (2, 3), коефіцієнт надійності за своєю суттю є коефіцієнтом запасу, який залишається незмінним протягом усього терміну експлуатації споруди.

$$\gamma_{lc} F \le \frac{R}{k_H} \qquad (4)$$

де γ_{lc} =0,8...1,0 – коефіцієнт сполучення навантажень; *F*- розрахункове значення узагальненого силового впливу; *R* – розрахункове значення узагальненої несучої здатності споруд.

Таким чином, використовуючи коефіцієнт k_H можна змінити масу споруди, поперечний розмір та інші параметри, розміри яких визначені із умови граничного стану k_H=1,0.

Зважаючи на залежність процесу зниження надійності гідромеліоративних об'єктів від множини стохастичних факторів, оцінювання надійності цих споруд вимагає заміни детерміністичних моделей на імовірнісні.

У теорії надійності технічні системи оцінюються показниками, які не лише мають певне значення, але й часто змінюються з часом (наприклад, імовірність безвідмовної роботи або коефіцієнт оперативної готовності).

Ц.Є.Мірцхулава в першому наближенні запропонував встановлювати мінімально допустимі рівні надійності для споруд і елементів гідромеліоративних систем, диференційовано залежно від важливості об'єкта та наслідків його можливої відмови [5, 6].

У такому випадку, коефіцієнт надійності можна розглядати як показник збільшення рівня надійності, тобто імовірності безвідмовної роботи у порівняно з базовим (початковим) значенням рівнем надійності.

Функціональну залежність в околі не критичної точки можна апроксимувати лінійною функцією. Виходячи з цього, зв’язок між коефіцієнтами надійності k_H і допустимими рівнями надійності $P_Д$ споруд наближено можна записати [1]

$$\frac{P_{Дi}}{P_{Д\,min}} = \frac{k_{Hi}}{k_{H\,min}} \qquad (5)$$

Для споруд класу наслідків СС3 прийнято $P_{Д_1}$ =0,9999, k_{H_1} =1,25, а $k_{H_{min}}$ =1,0 тоді за формулою (5) $P_{Д_{min}}$ =0,80 [3-6].

Використовуючи $P_{Д_{min}}$ =0,80 за формулою (5), отримано допустимі рівні надійності для споруд відповідних класів капітальності табл. 1.

Таблиця 1. Значення допустимого рівня надійності $P_Д$ і коефіцієнтів запасу k_H для гідротехнічних споруд відповідно до класу капітальності та класу наслідків (відповідальності)

Класи капіталь-ності споруд	Класи і підкласи наслідків (відповідальності) споруд	Категорії відповідальності конструкції та її елементів	Коефіцієнти надійності, k_H	$P_Д$ за формулою (5)	$P_Д$, яке пропонується [5,6]
I	СС3	А	1,250	0,9999	0,9999
		Б	1,200	0,960	
		В	1,150	0,920	
II	СС2-1	А	1,200	0,960	0,990
		Б	1,150	0,920	
		В	1,100	0,880	
III	СС2-2	А	1,150	0,920	0,950
		Б	1,100	0,880	
		В	1,000	0,800	
IV	СС1	А	1,100	0,880	0,900
		Б	0,975	0,780	
		В	0,950	0,760	

Враховуючи існуючу класифікацію гідромеліоративних споруд [1-6] і результати табл. 1, допустимі рівні надійності можна призначити у межах (табл. 2).

Таблиця 2. Значення допустимих рівнів надійності $P_Д$ для гідромеліоративних споруд залежно від класу капітальності та класів наслідків (відповідальності)

Площа *F*,тис.га., яка обслуговується спорудою, характеристика споруди	Класи капітальності споруд	Класи і підкласи наслідків (відповідальності) споруд	Розрахункове значення $P_Д$
>300	I	СС3	0,92…0,999
100...300	II	СС2-1	0,88...0,99
50...100	III	СС2-2	0,80...0,95
$\le$50	IV	СС1	0,76...0,90

Для споруд гідромеліоративних систем не наведено рекомендацій щодо розподілу конструкцій за категоріями відповідальності відповідно до класів наслідків, тому їх віднесено до категорії Б [4].

Оскільки найважливішим етапом створення надійних і ефективних об’єктів і систем є етап

проектування, то доповнення детерміністичних методів розрахунків імовірнісними моделями дозволяє проектувати споруди з призначеним рівнем безвідмовності, виконувати оцінку безвідмовності споруди на протязі часу дії розрахункових навантажень, уникнути невиправданих затрат на будівництво споруд і можливих збитків, що зумовлюються відмовами споруд.

Література

[1] І.І. Надійність споруд гідромеліоративних систем / навчальний посібник. К.: ІСДО, 1994. 424 с.

[2] ДБН В. 2.4–1–99 Меліоративні системи та споруди. К.: Держбуд України, 1999. 112 с.

[3] ДБН В.2.4-3:2010 Гідротехнічні споруди. Основні положення . К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 36 с.

[4] ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства, 2018. 29 с.

[5] Мирцхулава Ц.Е. Надёжность гидромелиоративных сооружений. – М.: Колос, 1974. 424 с.

[6] Мирцхулава Ц.Е. О надёжности крупных каналов. М.: Колос, 1981. 318 с.

СЕКЦІЯ 2

ЕНЕРГЕТИКА ТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

MCIT Modeling, control & information technologies

Numerical Modelling and Transient Analysis of a Small Hydropower Plant

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.017

Eva Bílková
Faculty of Civil Engineering,
Department of Hydraulic structures
Czech Technical University in Prague
Prague, Czech Republic
eva.bilkova@fsv.cvut.cz

Petr Nowak
Faculty of Civil Engineering,
Department of Hydraulic structures
Czech Technical University in Prague
Prague, Czech Republic
eva.bilkova@fsv.cvut.cz

Abstract—**This paper presents the development and evaluation of a mathematical model of the small hydropower plant (SHPP Plavisko), focusing on transient hydraulic phenomena during typical and emergency operational states. The model, created using modular hydraulic and turbine components, simulates the dynamic response of the system under various conditions, including start-up, normal shutdown, generator trip, and emergency closures. The results of numerical simulations are evaluated in terms of pressure transients, turbine rotational speed, and overall system safety. The findings provide valuable insights into the hydraulic design and operational safety of small-scale hydroelectric installations.**

Keywords: Hydropower, water hammer, hydraulic simulation

Introduction

The operation of small hydropower plants (SHPs) involves several transient hydraulic processes that occur during routine and emergency conditions. These include system start-up, shutdown, sudden load rejection, and turbine control manipulations. Although small hydropower systems operate at relatively low heads and moderate flows, improper control or inadequate design can cause dangerous pressure surges or cavitation within the penstock and turbine system.

This study focuses on the small hydropower plant SHPP Plavisko and aims to develop a mathematical model capable of predicting the hydraulic and mechanical behavior of the installation under a range of operational scenarios. The primary objectives were to construct a modular numerical model that accurately represents the hydraulic and mechanical components of the system, to evaluate transient pressures and rotational speeds under different operational states, and to determine safe opening and closing times for turbine guide vanes and valves, ensuring that neither overpressure nor cavitation occurs.

Methodology

The model of the hydropower plant was assembled using predefined computational blocks corresponding to key hydraulic and mechanical components. The upper boundary condition was modelled as a constant head reservoir, followed by a discretized penstock divided into 18 segments. The turbine was represented by a Francis turbine block with two variations: fixed and adjustable guide vane openings. The valve was placed upstream of the turbine, and the turbine shaft was coupled with a synchronous generator operating at 750 rpm.

From several tested solvers, the variable-step solver ode15s proved most stable and efficient. Relative tolerance was set between 10^{-6} and 10^{-9}. The friction factor in the penstock was calibrated to match the design head of 32 m at a discharge of 1.2 m³/s, resulting in $\lambda = 0.016$. The wave speed was calculated as $a = 940$ m/s.

Model Description

The model of the hydropower plant (Fig. 1) was assembled using predefined computational blocks corresponding to key hydraulic and mechanical components. The upper boundary condition was modelled as a constant head reservoir, followed by a discretized penstock divided into 18 segments. The turbine was represented by a Francis turbine block with two variations: fixed and adjustable guide vane openings. The valve was placed upstream of the turbine, and the turbine shaft was coupled with a synchronous generator operating at 750 rpm.

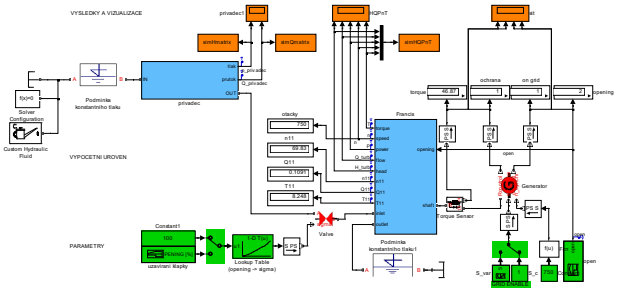


Figure 1 - Simulation scheme of SHPP with long penstock, Francis turbine, main valve and synchronous generator

Simulation Scenarios and Results

Two transition states that occur during normal operation of small hydropower plants were simulated: start-up at full power and normal shutdown. One critical

transition state was simulated as a generator failure at full power followed by emergency closure of the control valve.

A. Start-up

Start-up is commonplace and should not critically load the hydraulic system, but it is assessed, nonetheless. Because start-up is driven by progressive guide-vane opening, the adjustable GV model with flow and torque characteristics (Fig. 2) is used.

Procedure used: linear opening to a = 2 over 10 s; generator synchronization to the grid after 60 s; then linear GV opening to full output over 50 s. Opening a = 2 corresponds to $Q_{min} = 0.2$ m³/s.

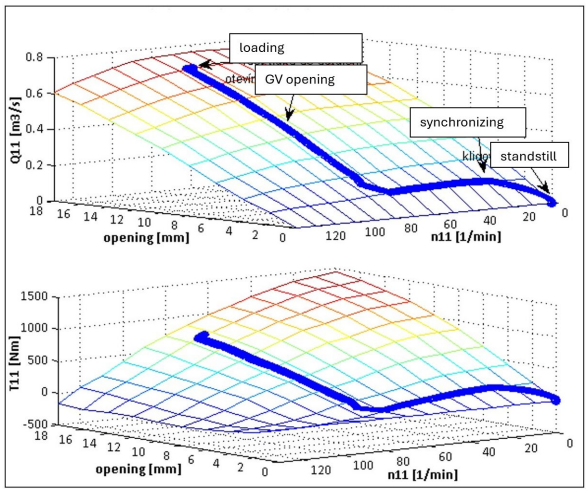


Figure 2 - Simulation of turbine startup and loading

As GV opens, discharge rises and net head across the turbine drops due to hydraulic losses and water inertia. The increase in flow also triggers negative pressure waves (water hammer), but these are quickly damped because the flow is sufficient. Synchronous speed is reached in roughly 50 s from initial opening. Torque peaks shortly after opening begins (rotating mass inertia overcoming); after grid connection torque reflects delivered power plus friction losses. The envelope of pressure minima (Fig. 3) shows no harmful vacuum for the proposed opening law.

GV opening time from zero to a = 2: ⩽ 4 s causes vacuum at least at one penstock location (critical around station 260 m); 10 s is safe with sufficient margin. GV opening from zero to full (a = 16): ⩽ 10 s leads to column separation; 10 – 30 s yields sub-atmospheric but non-cavitating pressures; > 30 s shows no vacuum.

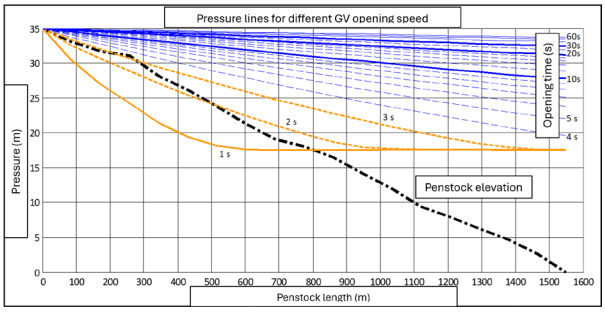


Figure 3 - Minimum pressure lines for different GV opening time

B. Normal Shutdown

A normal stop closes the guide vanes; the generator is disconnected just beforehand by reverse-power protection to avoid motoring. GV closure must avoid excessive surge and prevent vacuum in the penstock.

Design case: linear RK closure from full to zero over 30 s (with the same slope applied for partial-load shutdowns). During closure, discharge and speed decrease; the head upstream of the turbine rises, peaking at full closure. With zero discharge, surge damping is weaker than during start-up. Envelope assessment shows: ⩽ 10 s closure would overstress and cavitate; 11 – 20 s avoids overstress but may draw air through joints; ⩾ 25 s no vacuum. Therefore, 30 s is acceptable with safety margin (Fig. 4).

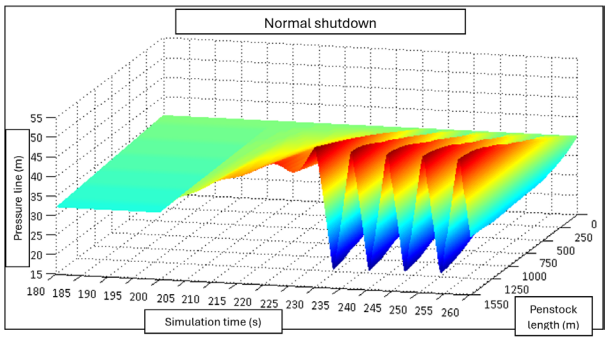


Figure 4 - Pressure as function of penstock length and time

C. Generator trip and GV closure

To avoid prolonged high-speed operation after a trip, a common response is rapid GV closure (Fig. 5). Model: adjustable GV; closure over 20 s beginning effectively at the trip (t = 200 s). The inlet valve remains fully open.

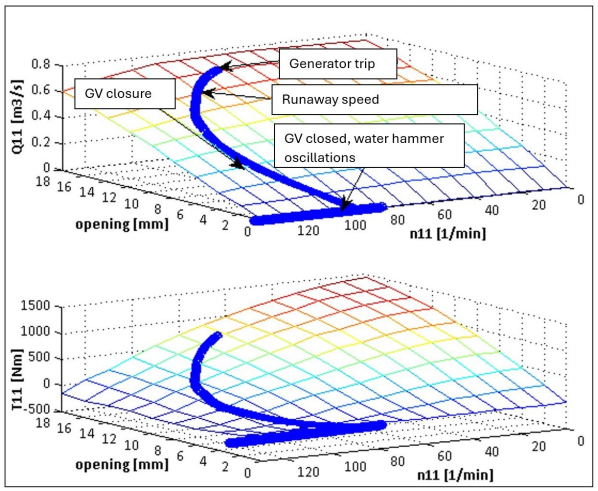


Figure 5 - Simulation of generator trip and emergency GV closure

Here, discharge falls due to both trip dynamics and GV closure, so head rises, and a water hammer develops (Fig. 6). With zero discharge at the end, damping is small. Because turbine characteristics shift with opening, the set accelerates to a higher peak speed than in 5.4.3, reaching about ~1370 rpm, then is hydraulically braked to rest (negative torque/power). Envelope plots show the chosen 20 s closure is safe (Fig. 7): no overstress and no damaging vacuum. Parametrisation

indicates: ≤ 10 s causes high-pressure exceedance and cavitation risk; 10–16 s no overstress but vacuum/air-ingress possible; ≥ 17 s no vacuum.

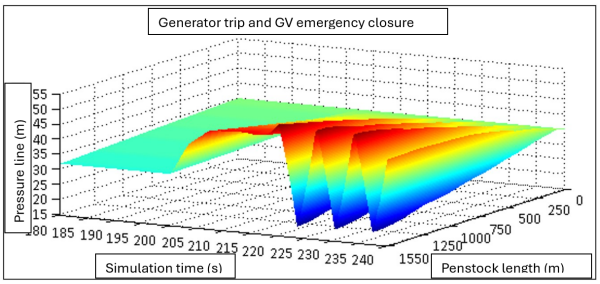


Figure 6 - Pressure as function of penstock length and time

If closure is long enough, the trip-induced wave and the closure-induced wave do not peak simultaneously, increasing slope rather than peak magnitude; this allows shorter safe closure times than normal shutdown.

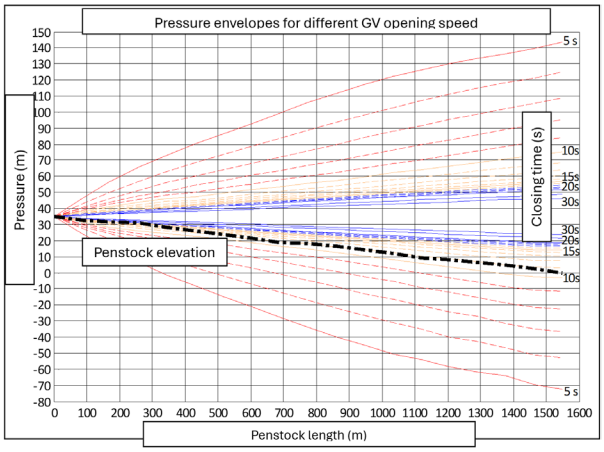


Figure 7 - Envelope of min/max pressure lines for different GV closing times

Discussion

The simulations highlight the importance of control sequences. Start-up and shutdown times critically affect pressure transients. Generator trip events are dominated by mechanical overspeed, whereas combined hydraulic-mechanical interactions occur during emergency closures. Compound valve closure proved an effective compromise between fast response and acceptable hydraulic load.

Conclusions

A detailed numerical model of the SHPP Plavisko hydropower plant was successfully developed. The study confirmed safe operational parameters for start-up, normal shutdown, and emergency states. Closure times longer than 20 s ensure safe hydraulic conditions. The inclusion of an air admission valve downstream of the main gate is recommended to prevent vacuum-induced damage. The model provides an essential tool for transient analysis and design optimization in small hydropower systems.

Acknowledgements

The author gratefully acknowledges the design documentation and operational data provided for the SHPP Plavisko plant and our student Tomáš Rudolf for cooperation.

References

[1] Josef Záruba: “Water Hammer in Pipe-Line Systems”, Elsevier, 1993

[2] M. Hanif Chaudhry: “Applied hydraulic transients”, Springer, 1987

[3] V. L. Streeter, E. B. Wylie: “Hydraulic Transients”, McGraw-Hill, 1967

[4] C. Nicolet: “Hydroacoustic modeling and numerical simulation of unsteady operation of hydroelectric systems”, EPFL Lausanne, 2007

[5] Nicolet, C.; Allenbach, P.; Simond, J.J.; Avellan, F.: „System Modelling of Hydraulic Power Plants for the Study of Electrical Power System Stability“, Hydro 2005 Conference, Villach, Austria

MCIT Modeling, control & information technologies

Design Features of Nonisolated DC/DC Converters for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.018

Volodymyr Dubovyk
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
processor-w@ukr.net

Liudmyla Mitiuk
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
luda2010703@gmail.com

Karina Shtanheieva
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
shtangeyevakarina@gmail.com

Kate Osadchik
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
dovlinafaust@gmail.com

Bohdan Shecvhuk
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
b.shevchuk.ha31@kpi.ua

Abstract—**The maximum power point tracking (MPPT) algorithm is essential for the system to operate at the maximum power point (MPP) under different irradiance and temperature conditions to improve efficiency. This paper presents a comparative study of various non-isolated DC/DC converter topologies using several MPPT methods: the perturbation and observation (P&O) method, the constant voltage method, and the power increment method using simulation. It can be concluded that there is no universal optimal solution for photovoltaic systems with MPPT methods and DC/DC converters, and the choice of MPPT depends on factors such as location, cost, implementation complexity, tracking accuracy and speed, and provides practical recommendations for the application of stand-alone photovoltaic systems.**

Keywords— Photovoltaic system, shading, maximum power point tracking

This MPP shifts with changing weather conditions. For illustration, P–V curves of a PV module, including the effects of irradiance and temperature, are simulated and shown in Figure 1. When cells within a module are subjected to varying irradiance levels, partial shading conditions arise, causing the P–V curve to exhibit multiple peaks. Despite this, there exists a single Global MPP (GMPP). To ensure optimal efficiency, maximum power point tracking (MPPT) algorithms must accurately identify and track the GMPP amid other local peaks [1]. his work investigates three MPPT algorithms and three DC/DC converter topologies: the accurate and relatively fast perturb and observe (P&O), the fast but relatively inaccurate constant voltage, and the power increment method, which is capable of tracking the GMPP. These MPPT techniques are applied to control the duty cycle of three nonisolated DC/DC converters: the voltage step-down buck, the voltage step-up boost, and the bidirectional buck–boost converter [1].

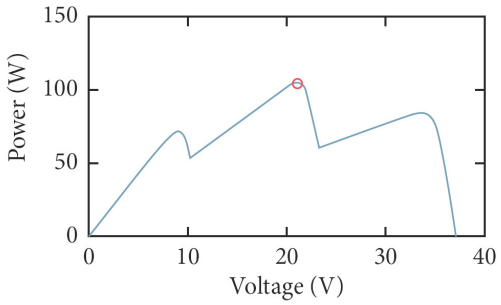


Figure 1. P–V curves under partial shading condition

Many MPPT algorithms were proposed and discussed in the literature [2]. Three algorithms are discussed in this work as follows: P&O, constant voltage, and power increment. One downside of the P&O is the inverse relationship between accuracy and speed, where achieving high accuracy and precisely locating the MPP rather than perturbing around it is on account of its convergence speed and vice versa. In addition, tracking the MPP under partial shading conditions is not guaranteed with the P&O, as it may get trapped in a local maximum of the multipeaked P–V curve under partial shading conditions and fail to reach the GMPP. Method Constant Voltage gained popularity due to its low implementation complexity and minimum hardware requirements. It tracks the MPP by simply neglecting the effects of temperature and irradiance on the voltage at MPP, relying on the fact that the voltage required to operate at MPP is almost constant with changing weather conditions, especially in the level of irradiance. This technique cannot locate the GMPP

under partial shading conditions. Power increment is one of the few MPPT techniques that support tracking the GMPP of the multipeaked P–V curve in the event of partial shading without any added complexity. Unlike the intelligent techniques, which are relatively complex to implement and require prior knowledge or training for the utilized PV system. The power increment tracks the GMPP by scanning the entire PV power curve and saves the duty cycle value at which the ultimate MPP occurs. However, this scanning affects its speed.

A. DC/DC Converters Topologies

It is mandatory to introduce a DC/DC converter connecting the PV modules to the load to compensate for the mismatch between the fixed resistance of the load and the varying weather-dependent resistance of the PV source. The derivation of the duty cycle required to equate those resistances and thus track the MPP can be derived for the buck converter. Buck converter decreases the input voltage while increasing the current according to Equations (1) and (2) as follows $V_0 = D \cdot V_{in}$, (1), $I_0 = I_{in}/D$, (2), where Vo and Io are the output voltage and current, Vin and Iin are the input voltage and current, respectively (in this case, the PV voltage and current), and D is the converter's duty cycle [3].

Observing Figure 2, the buck–boost converter has the apparent advantage of no practical MPP tracking limitations due to the relation between its output and input voltages, which dictates a duty cycle lying in its practical range between 0 and 1. Hence, the buck–boost converter is better when implementing an MPPT system than the buck and the boost topologies.

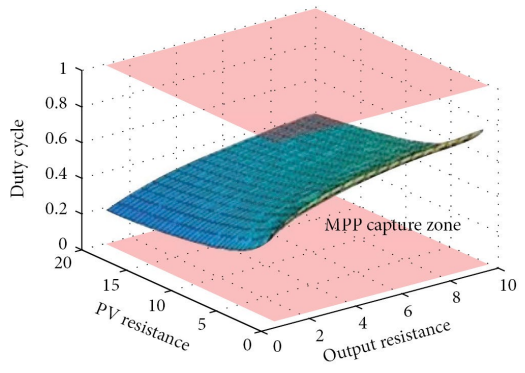


Figure 2. MPPT capture zone for buck–boost converters

II. Prepare Performance Evaluation Indices

Buck, boost, and buck–boost converters were chosen for their dominance in low-to-medium power PV systems and manageable control dynamics, in contrast to higher-order or isolated converters that, while more versatile, introduce unnecessary complexity for the intended scope. The MPPT techniques: P&O, constant voltage, and power increment, cover a representative range from low-complexity to high-accuracy strategies, ensuring practical insight into real-world performance trade-offs. An MPPT system with optimal performance does not exist. Hence, selecting the MPPT algorithm and the DC/DC topology becomes a function of various parameters that determine the desirable performance traits; these selection parameters are system application, location, and cost. 1. Convergence speed: The time the MPPT technique takes to drive the system's operating point to the MPP. The tracking speed of MPP algorithms is influenced by various factors, including some that are determined by the designer's expertise and preferences, often involving a trade-off between accuracy and oscillations.

2. Implementation complexity measured by main factors: the algorithm's complexity and factor is the universality of the MPPT algorithm; as such, AI-based algorithms require prior knowledge of the PV system, which limits its usage. Application and cost are the main deterministic selection parameters. This feature can be quantified by assessing the computational resources, the number and type of sensors required, and the complexity and cost of a compatible hardware control platform.

3. Tracking accuracy: the more accurate the MPPT technique is at locating the MPP, the higher the efficiency of the MPPT system. However, the desired high accuracy is usually attained on account of increased implementation complexity and convergence speed.

4. Tracking the GMPP under partial shading conditions: This MPPT's ability to track the GMPP of a multipeaked P–V curve improves the system's overall accuracy and efficiency. Generally speaking, algorithms with curve scanning features should be capable of tracking the GMPP

A. Quantitative Measures Description for MPPT Algorithms

1. Accuracy: Accuracy is a crucial metric for any algorithm's performance. This data point offers a meaningful insight into the benchmark performance of state-of-the-art algorithms.

2. Implementation complexity: This measure is essential for the practical applicability and implementation of the MPPT algorithms. Several factors contribute to algorithm complexity, such as hardware and PV panel specificity, sensor dependency, and generalizability of the algorithm.

3. Global MPPT tracking: An often-debated aspect of MPPT algorithms is their capability to trace the GMPP.

In summary, while certain aspects of MPPT algorithms can be viewed from a qualitative perspective, these quantitative measures provide a tangible framework for systematic evaluation and comparison across the board [4].

DC/DC converter

1. MPPT capture zone: This PI is set by the utilized DC/DC converter topology irrelative to the MPPT technique. This index represents the restriction the DC/DC converter imposed on the region where the MPP can be tracked. The selection of the DC/DC topology highly depends, in the first place, on the voltage gain. Thus, this PI is mainly determined by the application as a selection parameter.

2. Control complexity: This index measures the DC/DC converter-switching network control complexity. An easier-to-control switch is the grounded one instead of a floating high-side one, which increases system cost and necessitates a more complex gate drive controller. According to this PI, the boost converter is recommended as its switch is grounded.

3. DC/DC converter efficiency: Conversion efficiency is an important parameter determining the system's overall performance. The application governs the converter efficiency as a selection parameter PI.

4. Voltage and current ratings: Component ratings can be regarded as another index with an impact on the selection of the DC/DC topology, which in turn affects the efficiency and the cost of the implemented MPPT system [5].

B. Constant Voltage With the Three Nonisolated DC/DC Converters

The constant voltage algorithm investigated for the different DC/DC converters and loads as in Figure 3 250 W/m2 irradiance.

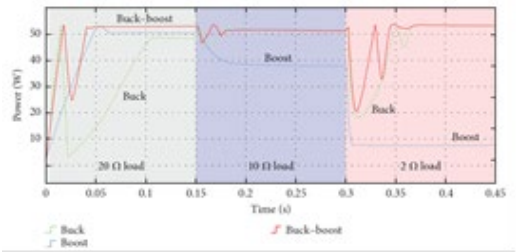


Figure 3. Constant voltage method under 250 W/m^2.

The constant voltage method is highly recognized by its convergence speed despite the DC/DC topology requiring around 0.05 s, as illustrated in Figure 3 However, this fast-tracking speed comes at the expense of accuracy, which impairs efficiency. This feature significantly increases energy harvested using constant voltage, especially in large-scale PV systems. It can be noted here that MPPT algorithms are irrelevant regarding the capture and noncapture zones of the DC/DC converter. In other words, similar to the P&O, the buck converter with the constant voltage method could only operate appropriately in its MPP capture zone under 2 Ω load at STC and 2 Ω and 10 Ω at 250 W/m2.

C. Power Increment With the Three Nonisolated DC/DC Converters

Where Figure 4 shows performance at and 250 W/m^2.

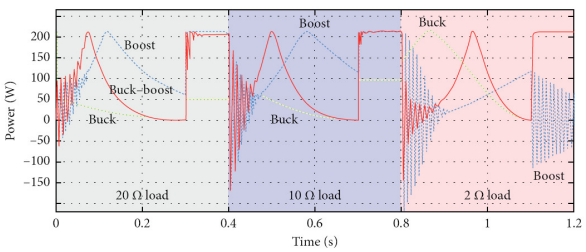


Figure 4. Power increment method under 250 W/m^2.

The power increment scans the whole P–V curve, enabling it to monitor all power points and accurately locate the GMPP. As was the boost with 2 Ω under STC and 10 Ω and 2 Ω under 250 W/m2. This confirms the system's failure regardless of the MPPT algorithm if the converter lies in its MPPT noncapture zone. Moreover, due to its linearity, the buck (in the dotted green trace) introduced an oscillation-free response under all operating conditions. In contrast, the boost and buck–boost suffered high oscillations at extreme duty cycles. This operational condition can lead to two distinct phenomena, especially when assuming ideal components: 1. Discontinuous conduction mode (DCM): This mode can result in varied transient responses, which may subsequently lead to voltage fluctuations or variations.

2. Nonlinear behavior of components: Essential components in DC–DC converters, such as diodes, exhibit nonlinear characteristics, particularly during swift switching events. The pronounced effects of this nonlinearity become more evident when the duty cycle is approaching zero, given the extremely short duration of switching events.

This nonlinearity can lead to output voltage instability at certain duty cycle values. Specifically, a duty cycle value that theoretically results in infinite output voltage will induce oscillations [6].

D. The Three MPPT Algorithms Under Varying Temperature

Figure 5 highlights the effect of temperature variation on the performance of the MPPT algorithms, which is irrelevant to the DC/DC topology; thus, the buck converter was used. A sudden extreme temperature drop was investigated, decreasing from 45 to 10°C at 0.4 s.

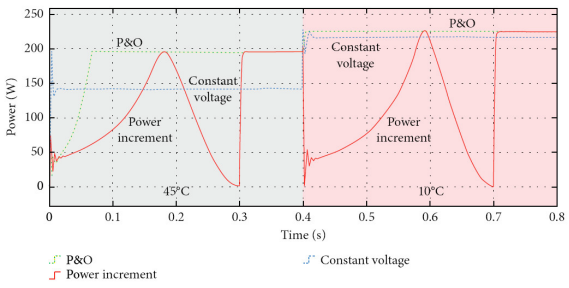


Figure 5. P&O, constant voltage, and power increment MPPT under varying temperature

Starting with the P&O (in dotted green), it clearly maintains its accurate MPP tracking under different temperatures. The P&O reached the new MPP very rapidly compared to a sudden change in irradiance. This can be explained concerning (3), as the temperature change slightly affects the voltage, which in turn insignificantly affects the MPP resistance, unlike the change in irradiance, which significantly affects the current, and hence the resistance is considerably changed. On the other hand, as seen in Figure 5, this change in MPP voltage caused by temperature fluctuation significantly impacted the constant voltage tracking accuracy (in dashed blue),

which depends, in theory, on setting the voltage to a stable value.

The final MPPT comparison aspect is the ability of the MPPT algorithm to operate under partial shading conditions, which is irrelevant to the DC/DC converter. Therefore, due to its linearity, the buck converter was selected here. The power increment outperforms the P&O and the constant voltage because it scans the entire P–V curve, allowing for the recording of all power points and the ability to identify the maximum, which is crucial for detecting the GMPP in conditions of partial shading [7].

E. Design guidelines as follows

Headings, or heads, are organizational devices that guide the reader through your paper. There are two types: component heads and text heads.

1. The boost and buck–boost need higher inductance than the buck for the same current ripple.

2. The buck converter's required output capacitor is lower than that for the other converters.

3. An additional blocking diode is required for the buck and the buck–boost to avoid the reverse flow of the current, whereas, in the boost converter, the bypass diode does this job.

Enerally, the initial duty cycle selection significantly affects the speed at which the P&O algorithm locates the MPP.

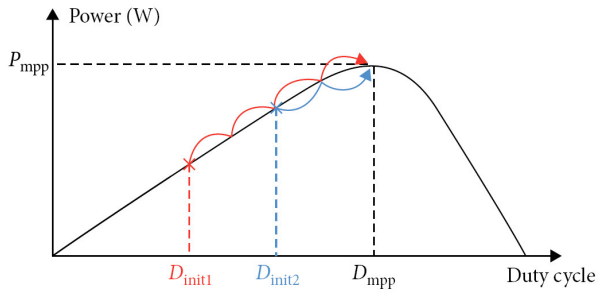


Figure 6. Visualization of initial duty cycle on speed of MPP Tracking.

Figure 6 demonstrates that the time savings are proportional to the absolute difference between the initial duty cycle Dinit and optimal Dmpp for a given step size. A P&O algorithm starting with initial duty cycle Dinit1 requires twice as much time as it would with an initial duty cycle Dinit2 at the same step size. However, an effective MPPT controller and converter design should limit the duty cycle search space to a narrow range, which helps improve the overall speed of locating the MPPT.

The buck–boost topology showed its superiority in MPP tracking under different weather and load conditions, as it has no limitations or restrictions, unlike the buck and boost topologies. However, the fact that it can step up or down the voltage undesirably, along with inverted output polarity, may lead the user to avoid its use. From a broad perspective, selecting the optimal DC/DC converter is application-specific, but some general guidelines can assist in this process. For instance, the linear Buck might be ideal for applications with high resistive loads to ensure an MPP capture zone. On the other hand, the simplest-to-control boost could be a better option for low-resistive loads. The buck–boost is the best choice in highly fluctuating loads due to its nonrestrictive capture zone, despite its inverting output and gain nonlinearity.

Regarding the MPPT techniques, the P&O showed a very accurate performance at a slower speed to reach the MPP compared to the constant voltage, which in turn lacks the level of accuracy achieved by the P&O. However, neither the P&O nor the constant voltage was able to track the GMPP relative to the power increment. Once again, the choice among MPPT algorithms depends on the specific application and location. The P&O is often a better choice for regions prone to dynamic weather changes. In contrast, locations with partial shading issues may require the power increment and the constant voltage, which are the easiest to implement and the fastest in MPP tracking.

Last but not least, neither the initial duty cycle choice nor the MPPT algorithm could overcome the inherent constraint of the DC/DC converter's MPP noncapture zones, primarily governed by irradiance compared to temperature change. Similarly, the inability to track the GMPP is due to the MPPT algorithms, which the DC/DC converter topology cannot enable.

References

[1] Marco Tina G., Simulation Model of Photovoltaic and Photovoltaic/Thermal Module/String Under Nonuniform Distribution of Irradiance and Temperature, Journal of Solar Energy Engineering. (2017) 139, no. 2, https://doi.org/10.1115/1.4035152, 2-s2.0-85009223605, 021013.

[2] da Rocha M. V., Sampaio L. P., and da Silva S. A. O., Comparative Analysis of MPPT Algorithms Based on Bat Algorithm for PV Systems Under Partial Shading Condition, Sustainable Energy Technologies and Assessments. (2020) 40, https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100761, 100761

[3] Singh S. N., Selection of Non-Isolated DC-DC Converters for Solar Photovoltaic System, Renewable and Sustainable Energy Reviews.(2017) 76, 1230–1247, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.130.

[4] Saharia B. J. and Saharia K. K., Simulated Study on Nonisolated DC-DC Converters for MPP Tracking for Photovoltaic Power Systems, Journal of Energy Engineering. (2016) 142, no.1, https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000261,

[5] Majd Ghazi Batarseh, Muhy Eddin Za'ter, Ameer B. Batarseh, Sandy Yacoub Miguel. Performance Assessment and Design Recommendations of Nonisolated DC/DC Converters and Maximum Power Point Tracking Techniques for Standalone Photovoltaic Systems. International Journal of Energy Research Volume 2025, Issue 1. First published: 19 August 2025, https://doi.org/10.1155/er/6750449

[6] Osmani K., Haddad A., Lemenand T., Castanier B., and Ramadan M., An Investigation on Maximum Power Extraction Algorithms From PV Systems With Corresponding DC–DC Converters, Energy. (2021) 224, https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120092

[7] Sadhukhan A., Gayen P. K., and Saha S. S., High Performance of Dual Input H-Bridge DC–DC Converter in Solar Application, AEU - International Journal of Electronics and Communications. (2022) 154, https://doi.org/10.1016/j.aeue.2022.154295, 154295.

MCIT Modeling, control & information technologies

Development of Software for the Design of Differential Pressure Flowmeters in Accordance with the Updated ISO 5167:2022

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.019

Oleh Masniak
Institute of Energy and Systems Management (IESM)
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
oleh.y.masniak@lpnu.ua

Solomiia-Anna Vyshnevska
Institute of Computer Science and Information Technologies (ICSIT)
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
solomiia-anna.vyshnevska.mpzip.2024@lpnu.ua

Abstract – **This paper presents a study on the relevance of developing new software that implements the updated ISO 5167:2022 standard. The market for automating the design of variable pressure differential flowmeters was studied, and it was determined that with the successful launch of the software as a web application, there could be approximately 5,000-7,000 users worldwide. The main competitors of the future application were studied, namely FLOWCALC32, САПР «ВИТРАТОМІР» and AFT FATHOM. Based on the functionality of analogues, a competitive matrix was constructed indicating the advantages of the new DifFlow product.**

Keywords – software; web application; flowmeter; differential pressure method

I. Introduction

In the modern world, the efficient use of energy resources, particularly natural gas, is a key factor in ensuring the sustainable development of the industry and the energy sector. Accurate measurement of gas flow is critically important for maintaining energy security, optimising technological processes, commercial accounting, and environmental monitoring. To ensure these aspects, international standards have been implemented that regulate methods for measuring gas flow. One such document is ISO 5167:2022 [1], which defines a method for calculating gas flow using standard flow-restricting devices (such as orifice plates, Venturi tubes, and nozzles). This method is known as the differential pressure method.

When designing differential pressure flowmeters for natural gas, it is essential to ensure not only compliance with regulatory requirements but also the convenience of the interface for engineers, operators, and other users. At the same time, existing software tools are often outdated, difficult to maintain, or lack proper support for the latest versions of standards. This context highlights that developing a web application to automate the design of differential pressure flowmeters in accordance with ISO 5167:2022 is both relevant and practically significant.

The development of the new system will provide an innovative web application for the automated calculation and design of flowmeters in accordance with ISO 5167:2022. The application enables fast and accurate computations based on the updated international standard, while also providing users with convenient and quick access to its functionality.

The flowmeter industry is undergoing digital transformation, creating significant opportunities for innovation but also increasing competition within the field. Creating a web application that automates calculations and adapts the standard's requirements for practical use will allow enterprises to optimise their processes. The DifFlow project aims to solve a practical problem: developing a universal tool that enables companies to effectively apply the latest ISO 5167:2022 standard, automate complex calculations, and ensure compliance with the accuracy and reliability requirements of differential pressure flowmeters.

II. Market Research on Automation of Flowmeter Design

Natural gas and oil remain among the leading sources of energy, while the pharmaceutical and chemical industries are experiencing moderate growth driven by technological progress. Consequently, the demand for flowmeters – the design of which is the focus of the developed product – continues to increase.

According to technical documents [2], [3] describing the main changes in the new edition of ISO 5167:2022, the updated version provides clarified recommendations for flow measurement and extends the applications of differential pressure flowmeters.

As of 2019, over 200 major companies [4] worldwide engaged in the extraction, transportation, and/or storage of natural gas and oil. The adoption of ISO 5167:2022 is crucial in countries with stringent industrial regulations, such as the United States, the European Union, and certain parts of Asia. However, not all companies in these sectors will immediately adopt automated solutions. Assuming an initial conservative implementation rate of 3-5% of the total

number of companies in these industries worldwide, the lower bound of potential users may be around 5,000-7,000 clients globally.

The flowmeter and process automation market in industries that must comply with standards such as ISO 5167:2022 is significant, encompassing hundreds of thousands of medium and large enterprises worldwide. Considering the growing trend of digital transformation in industrial sectors – not only in oil and gas but also in pharmaceutical and chemical industries – the upper estimate may rise to 10,000-20,000 companies worldwide within the next 5-10 years, as more companies seek to optimise operations and ensure compliance with international standards such as ISO 5167:2022.

The flowmeter market in 2023 was valued at USD 7 billion [5], with projections suggesting it could reach USD 13 billion by 2033. Moreover, the implementation and adoption of new standards increases measurement accuracy and expands the overall market volume.

The growing demand for renewable energy sources, such as natural gas, continues to drive market expansion. Alongside this growth, the need for automated solutions for the design of differential pressure flowmeters is also increasing. Such solutions must ensure high accuracy and compliance with the latest standards.

III. Competitor Analysis

The main competitors of the web application for automated calculation and design of differential pressure flowmeters include FLOWCALC32 (Gothenburg, Sweden) [6], САПР «ВИТРАТОМІР» (eng. CAD “Flowmeter”) (Lviv, Ukraine) [7], and AFT FATHOM (Colorado, USA) [8].

FLOWCALC32 CE is a Windows-based program for calculating various devices used for measuring flow with the differential pressure method. It can be applied to the calculation of orifice plates, Venturi tubes, and nozzles, as well as to the assessment of the effects of changing operating conditions, pipe diameters, and orifice dimensions of the primary device.

Compared to the developed web application, FLOWCALC32 has an outdated interface and is based on an older version of the standard (1991).

САПР «ВИТРАТОМІР» (until February 27, 2025, known as САПР «РАСХОД-РУ») is a program designed for the calculation and design of differential pressure flowmeters with standard flow-restricting devices in accordance with the set of intergovernmental standards DSTU GOST 8.586.(1-5):2009 (ISO 5167-(1-4):2003). This is a desktop application that operates according to a modified Ukrainian standard, rather than the international one.

In comparison, the developed application targets the international ISO 5167:2022 standard, whereas САПР «ВИТРАТОМІР» is primarily aimed at post-Soviet markets and relies on an outdated version of the standard.

AFT FATHOM is a fluid dynamics modelling software used to calculate pressure drops and flow distribution in liquid and gas pipelines with low flow velocities.

Compared to the developed application, AFT FATHOM holds a strong position in the international market, offering broader functionality for simulating fluid flow and component interactions.

Among indirect competitors, there are programs with extensive engineering functionality where the design and calculation of differential pressure flowmeters are not the primary focus but are included as part of the feature set. For instance, Honeywell’s UniSim Design Suite is a process simulation software that helps engineers create steady-state and dynamic models. Meanwhile, OpenFOAM offers a wide range of tools for solving problems, including complex fluid flows (with chemical reactions, turbulence, and heat transfer), as well as acoustics, solid mechanics, and electromagnetics.

A comparison of the key features of DifFlow with its three main competitors – FLOWCALC32, САПР «ВИТРАТОМІР», and AFT FATHOM – is presented in Table I.

TABLE I. Competitor Matrix

Feature	DifFlow	FLOWCALC32	САПР “ВИТРА-ТОМІР”	AFT FATHOM
ISO 5167:2022	+	-	-	-
Payment model	Subscription	Freemium	Software package purchase	Per-seat
Application type	Web	Desktop, only for Windows	Desktop	Desktop or web, with limited functionality
Report generator	+	+	+	Customize templates
Ease of Use	+	+	+	+

IV. Overview of the Developed Software

The developed DifFlow software, implemented as a web application, performs parameter calculations for the mathematical model of differential pressure flowmeters for gases and liquids in accordance with ISO 5167:2022, depending on the technical and design characteristics of their application.

The web application enables users to input the necessary parameters for the working fluid, primary measuring devices, and structural characteristics of the measurement pipeline. After performing the calculations, the application outputs the complete mathematical model of the differential pressure flowmeter based on the input data provided by the user.

The complete mathematical model is presented as a calculation report, which includes the dimensional parameters of the primary device displayed in a

schematic drawing. The report is available in two formats: full and abbreviated. Additionally, the web application provides the calculated components of measurement uncertainty for the flow meter.

Furthermore, users can access reference information, including protocol formats and types of flow-restricting devices, and verify whether the medium parameters and calculation results comply with the requirements of the international standard.

CONCLUSION

The software's advantages include its innovative functionality, particularly the implementation of calculations in accordance with the 2022 edition of the international standard ISO 5167. The application is developed as a web-based platform, providing users with the flexibility to access it from any location with an internet connection.

The product features a user-friendly interface and ensures accurate calculations. Business clients can utilise the software for automated calculation and design of differential pressure flowmeters, significantly improving both the quality and speed of their operations.

REFERENCES

[1] ISO 5167:2022 (1-5). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. Official edition.

[2] Harris M., TÜV SÜD National Engineering Laboratory (NEL) ISO 5167: past and present. Global flow measurement workshop: Global workshop, Aberdeen, 25–27 October 2022. URL: https://nfogm.no/wp-content/uploads/2024/06/3-ISO-5167-Past-and-Present-TUV-MRH.pdf (date of access: 24.09.2025).

[3] Collins A., Clark S. Additional data supporting the 2022 updates to the ISO 5167 standards. Flow measurement and instrumentation. 2022. P. 102193. URL: https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102193 (date of access: 24.09.2025).

[4] Muspratt A. The Top 10 Oil & Gas Companies in the World: 2019. Oil&GasIQ. URL: https://www.oilandgasiq.com/strategy-management-and-information/articles/oil-and-gas-companies (date of access: 24.09.2025).

[5] Jha S. N. Fact.MR. (2020). Flow Meter Market Forecast, Trend Analysis & Competition Tracking – Global Market Insights 2020 to 2030. Fact.MR. URL: https://www.factmr.com/report/4630/flow-meter-market (date of access: 24.09.2025).

[6] Control Engineering – Control Engineering Software. Control Engineering. URL: https://www.controlengineering.se/en/ (date of access: 24.09.2025).

[7] Комп'ютерна програма «САПР «Витратомір»: Посібник користувача / Є.П. Пістун, Л.В. Лесовой, Ф.Д. Матіко, О.Я. Масняк, В.І. Роман − Львів: Видавництво ПрАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2025. − 104 с..

[8] AFT Fathom | Fluid Dynamic Simulation Software. AFT | Pipe Flow Modeling Software for Engineers. URL: https://www.aft.com/products/fathom (date of access: 24.09.2025).

Оцінювання значень параметрів моделі конденсаторного збуджувача асинхронного генератора

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.020

Святослав Василець
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
s.vasylets@nuwm.edu.ua

Катерина Василець
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
k.s.vasylets@nuwm.edu.ua

Володимир Ільчук
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
v.v.ilchuk@nuwm.edu.ua

Анотація—**Запропоновано принцип побудови конденсаторного збуджувача для асинхронного генератора. Збільшення ступенів регулювання ємнісного струму досягається змінною топологією збуджувача. Шляхом регресійного аналізу оцінено значення параметрів математичної моделі збуджувача, яка враховує дію трьох факторів (кількість груп конденсаторів, кількість конденсаторів в кожній групі, крок зміни ємностей суміжних конденсаторів) та їх взаємодії. Встановлено несуттєвість впливу кроку зміни ємностей конденсаторів на параметри регулювання. Застосування збуджувача зі змінною топологією підвищить ефективність керування рівнем збудження автономного асинхронного генератора при зміні частоти обертання турбіни або потужності електричного навантаження.**

Keywords—асинхронний генератор; збудження; конденсаторні батареї; дискретне регулювання; змінна топологія

I. Актуальність питання

Пошкодження тепло- та гідроелектростанцій внаслідок бойових дій суттєво впливають на стан енергосистеми України. При відбудові генеруючих потужностей передбачається інтенсивний розвиток відновлюваних джерел енергії [1]. Відповідно до «Енергетичної стратегії України на період до 2050 року», встановлена потужність вітроустановок має бути збільшена до 140 ГВт, гідрогенеруючих об'єктів – до 9 ГВт.

У складі малих ГЕС, когенераційних та вітроустановок використовуються асинхронні генератори (АГ). Глобальний ринок таких генераторів оцінюється у 2,1 млрд доларів США за 2024 р. АГ може працювати у мережевому або автономному режимі [2], але у обох випадках генератор потребує джерела реактивної потужності для збудження. У випадку роботи у складі автономної електромережі АГ обладнують конденсаторними батареями. Однак, при зміні частоти обертання турбіни або потужності електричного навантаження реактивний струм збудження має змінюватися для підтримання сталої величини вихідної напруги. Для розв'язання такої задачі пропонується використовувати компаундні конденсатори [3]. Однак, такий спосіб характеризується обмеженим діапазоном регулювання. Також відомо для використання перетворювача STATCOM для зміни струму збудження [4], однак якість регулювання є недостатньою. Відомо про використання напівпровідникового перетворювача [5], однак це погіршує гармонійний склад вихідного струму генератора.

На основі аналізу стану питання можна встановити, що актуальною є задача стабілізації величини вихідної напруги асинхронного генератора при зміні частоти обертання турбіни та потужності навантаження.

Мета – підвищення якості вихідної напруги асинхронного генератора при дії збурень за рахунок обгрунтування структури та параметрів конденсаторного збуджувача зі змінною топологією, що забезпечує дискретне регулювання струму збудження.

II. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – конденсаторний збуджувач для асинхронного генератора. Предмет – процес дискретного регулювання ємності конденсаторного збуджувача зі змінною топологією. Розглядається трифазний збуджувач, з'єднаний за схемою трикутника. Фаза збуджувача включає декілька груп паралельно з'єднаних конденсаторів, кожен з яких

зашунтовано розрядним резистором. В межах групи число підключених конденсаторів може змінюватися за рахунок застосування напівпровідникових ключів. Суміжні групи конденсаторів з'єднуються міжгруповими комутаторами послідовно або паралельно. Сукупна ємність фази змінюється при комутації конденсаторів в мержах кожної групи та зміни схеми з'єднання суміжних груп [6]. Основна гіпотеза дослідження полягає у можливості мінімізації середнього кроку зміни ємності збуджувача при комутації ключів та комутаторів. Для визначення допустимих станів конденсаторного збуджувача розроблено алгоритм, який реалізовано як комп'ютерна програма CEVT, рис. 1.

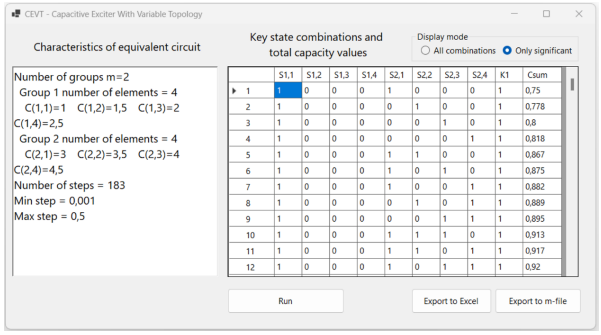


Рис. 1. Комп'ютерна програма CEVT

Параметри математичної моделі збуджувача оцінювалися за результатами чисельного експерименту, що проводився з використанням програми CEVT. Було проведено повний факторний експеримент типу 2^3. Досліджувався вплив трьох факторів на збуджувач: x_1 – кількість груп конденсаторів; x_2 – кількість конденсаторів в кожній групі; x_3 – крок зміни ємностей суміжних конденсаторів. Функцією цілі обрано математичне сподівання кроку зміни ємності збуджувача.

III. Результати дослідження

Встановлено суттєвий вплив кількості груп конденсаторів та числа конденсаторів у кожні групі на параметри збуджувача: їх збільшення суттєво збільшує загальну кількість допустимих станів збуджувача й верхню межу діапазону регулювання та зменшує математичне сподівання абсолютної величини кроку зміни ємності збуджувача. Шляхом регресійного аналізу оцінено значення параметрів математичної моделі збуджувача, табл. I:

$$\overline{\delta} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + \\ + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

Значення коефіцієнта детермінації 0,9 та скоригованого коефіцієнта детермінації 0,725 свідчать про достатню точність регресії. З аналізу асимптотичної значимості можна встановити, що фактор x_3 суттєво не впливає на функцію цілі самостійно і у взаємодії з іншими факторами, тому може бути виключений. Дисперсійний аналіз свідчить, що переважний вплив на функцію цілі мають фактори x_1 та x_2 порівняно з впливом їх взаємодії $x_1 \cdot x_2$.

ТАБЛИЦЯ I. Результати чисельного оцінювання значень коефіцієнтів моделі (6) шляхом регресії емпіричних значень

Коефіцієнт моделі	Оцінка коефіцієнта	Стандартна похибка	Асимптотична значимість p
b_0	1,0066	0,2848	0,0241
b_1	−1,3246	0,3488	0,0191
b_2	−1,1768		0,0279
b_3	−0,0958		0,7973
b_{12}	1,1019		0,0342
b_{13}	0,0767		0,8367
b_{23}	0,0465		0,9004
b_{123}	−0,0317		0,9319

Несуттєвість впливу фактора x_3 на функціонування збуджувача підтверджується одержаними регулювальними характеристиками

IV. Висновки та напрямок подальших досліджень

В результаті оцінювання значень параметрів регресійної моделі конденсаторного збуджувача підтверджено значимість впливу кількості груп та числа конденсаторів у кожній групі на ширину діапазону та крок регулювання. Зокрема, збільшення величин вказаних факторів з 2 до 4 розширює діапазон регулювання в 16 разів, а кількість кроків – у 827 разів (з 22 до 18209). Збільшення кількість ступенів регулювання дозволить підвищити точність формування ємнісного струму збудження генератора та компенсації індуктивної складової струму навантаження. Це підвищить ефективність керування рівнем збудження автономного асинхронного генератора при дії зовнішніх збурень.

Перелік посилань

[1] Кабінет Міністрів України (2024). Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року (Затв. розп. КМУ від 13.08.2024 р. № 761-р). https://surl.li/liijcp

[2] Markov, V.S., Honcharov, Ye.V., Kriukova, N.V., & Poliakov I.V. (2024). Simulation of an induction generator for a wind farm. Bulletin of the National Technical University "KhPI", Problems of electrical machines and apparatus perfection. Theory and practice, 1 (11). 24–27. https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.05

[3] Khan, M.F., Khan, M.R., & Iqbal A. (2022). Effects of induction machine parameters on its performance as a standalone self excited induction generator. Energy Reports, 8, 2302–2313. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.023

[4] Negi, G. S., Gupta, M. K., Saxena, N. K., & Mohan, H. (2024). Squirrel cage induction generator based micro grid voltage assessment with STATCOM using different metaheuristic approaches. Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 9, 100736. https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100736

[5] Guettab, A., Boudjema, Z., Bounadja, E., & Taleb, R. (2022). Improved control scheme of a dual star induction generator integrated in a wind turbine system in normal and open-phase fault mode. Energy Reports, 8, 6866–6875. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.048

[6] Vasylets S., Vasylets K., Ilchuk V. Determination of regulation characteristics of capacitor exciter with variable topology for self-excited induction generator. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 2(8 (134). Pp. 17–25. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.32617

MCIT Modeling, control & information technologies

Оцінювання фазових векторів напруг та струмів електромережі за дискретними відліками миттєвих значень

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.021

Святослав Василець
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
s.vasylets@nuwm.edu.ua

Владислав Глущук
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
hlushchuk.v_vg25@nuwm.edu.ua

Анотація—**Запропоновано метод оцінювання дійсних та уявних частин фазових векторів напруг та струмів електромережі за дискретними відліками миттєвих значень. Метод передбачає визначення проекцій на осі комплексної площини обертових фазних векторів, що обчислюються за дискретизованими значеннями сигналів, які відповідають миттєвим значенням фазних напруг та струмів. Обертові вектори загальмовуються, що спрощує аналіз фазових зсувів між ними. Застосування запропонованого методу дасть змогу підвищити точність виявлення аварійних режимів, надійність захисного відключення, ефективність обліку електроенергії у складі цифрової підстанції.**

Keywords—електромережа; фазовий вектор; миттєві значення; дискретні відліки; проекції

I. Актуальність питання

Відбудова та модернізація вітчизняних електростанцій, підстанцій, об'єктів розосередженої генерації найбільш ефективно можуть бути здійснені на основі стандарту IEC 61850. Стандарт передбачає цифровізацію обміну інформацією між всіма елементами об'єкта електроенергетики. Давачі струму, вимикачі та інші електротехнічні пристрої оснащується цифровим комунікаційним інтерфейсом, що підвищує точність виявлення аварійних режимів, надійність захисного відключення, ефективність обліку електроенергії. Передача в режимі реального часу параметрів синусоїдних сигналів найбільш ефективно може бути здійснена з використанням комплексної величини – фазового вектора (phasor) [1]. Обмін синхронізованими даними між обладнанням енергосистеми в режимі реального часу регулюється стандартом IEEE Std C37.118.2-2024 [2].

Точність обрахування параметрів фазового вектора суттєво залежить від точності аналого-цифрового перетворення сигналів, що надходять від вимірювальних трансформаторів напруги та струму. Також на точність суттєво впливає метод оцінювання амплітуди та фази вектора за дискретними відліками вимірюваних сигналів. Відомо про використання рекурсивного алгоритму дискретного перетворення Фур'є для обрахування значень фазового вектора [3]. При необхідності виявлення широкосмугових коливань в електромережах параметри фазового вектора оцінюють для кожної гармоніки [4]. Також відомо алгоритм квадратурної демодуляції (quadrature demodulation) оцінювання параметрів фазового вектора [5]. Однак, відомі алгоритми характеризуються складною програмною реалізацією. Розроблення пристрою вимірювання параметрів фазового вектора (Phasor Measurement Unit, PMU) за дискретними відліками миттєвих значень струмів (напруг) є актуальною задачею, оскільки цифрова підстанція включає сотні PMU, від точності роботи яких залежить ефективність захисту та розподілу електроенергії.

Мета – підвищення ефективності оцінювання фазових векторів напруг та струмів електромережі за дискретними відліками миттєвих значень.

II. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – приєднання трифазної електромережі. Предмет – параметри комплексних амплітуд фазних напруг та струмів. Прийняті припущення: частота основної гармоніки 50 Гц; показники якості напруги не виходять за межі, визначені стандартом ДСТУ EN 50160:2023; пристрій вимірювання комплексної амплітуди приєднується до електромережі за допомогою вимірювальних трансформаторів напруг та струмів електромагнітного типу; вимірювальні трансформатори струму працюють в нормованому діапазоні струмів.

Вторинні вимірювальні перетворювачі напруги (наприклад, трансформаторного типу, ZMPT101B) та струму (на ефекті Холла, ACS712) забезпечують масштабування та зсув у додатну напівплощину вихідних сигналів. Аналого-цифрове перетворення сигналів кожного з шести вимірювальних каналів виконується дельта-сигма АЦП типу MCP3421, що оснащений послідовним I^2C інтерфейсом. При частоті дискретизації 240 Гц забезпечується 12-розрядна точність квантування аналогового сигналу. Подальше оброблення дискретних відліків сигналів,

що відповідають миттєвим значенням фазних напруг та струмів, здійснюється мікроконтролером (наприклад, типу ATMega2560). Програмне забезпечення дозволяє одержати проекції фазових векторів фазних напруг та струмів на осі комплексної площини.

III. Результати дослідження

Позначимо дискретизовані значення сигналів $u(nT)$ та $i(nT)$, що відповідають миттєвим значенням фазної напруги та струму, відповідно, приєднання електромережі в моменти часу t=0,T,2T,…, де T – період дискретизації сигналу за часом. При частоті напруги електромережі f_0 колова частота становить $\omega_0=2\pi f_0$. Тоді дискретизовані значення можуть бути описані аналітично:

$$u(nT) = U \cdot \sin(\omega_0 nT + \varphi_u); \quad (1)$$

$$i(nT) = I \cdot \sin(\omega_0 nT + \varphi_i). \quad (2)$$

Дискретизованим значенням відповідають обертові фазні вектори:

$$\underline{U}_r(nT) = U \cdot e^{j(\omega_0 nT + \varphi_u)} = \\ = U_{xr}(nT) + jU_{yr}(nT); \quad (3)$$

$$\underline{I}_r(nT) = I \cdot e^{j(\omega_0 nT + \varphi_i)} = \\ = I_{xr}(nT) + jI_{yr}(nT). \quad (4)$$

Проекції таких обертових векторів можуть бути обраховані за дискретизованими значеннями сигналів:

$$U_{xr}(nT) = \frac{u(nT) - u(nT - T)}{\omega_0 T}; \quad (5)$$

$$U_{yr}(nT) = u(nT); \quad (6)$$

$$I_{xr}(nT) = \frac{i(nT) - i(nT - T)}{\omega_0 T}; \quad (7)$$

$$I_{yr}(nT) = i(nT). \quad (8)$$

Аналізувати стан електромережі за обертовими векторами нераціонально. Оскільки всі вектори обертаються з однаковою частотою, то практичний інтерес представляють тільки фазові зсуви між векторами. Фазові співвідношення доцільно оцінювати, аналізуючи нерухомі вектори. Для цього останні слід домножити на $e^{-j\omega_0 nT}$. Зокрема, для вектора напруги отримаємо:

$$\underline{U}_f = U_{xf} + jU_{yf} = U \cdot e^{j(\omega_0 nT + \varphi_u)} \cdot e^{-j\omega_0 nT} = U \cdot e^{j\varphi_u}. \quad (9)$$

Проекції нерухомого вектора напруги визначаються наступним чином:

$$\underline{U}_f = \underline{U}_r(nT) \cdot e^{-j\omega_0 nT} = \\ = [U_{xr}(nT) + jU_{yr}(nT)] \times \\ \times [\cos(\omega_0 nT) - j\sin(\omega_0 nT)]; \quad (10)$$

$$U_{xf} = U_{xr}(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT) + U_{yr}(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT); \quad (11)$$

$$U_{yf} = U_{yr}(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT) - U_{xr}(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT). \quad (12)$$

Проекції нерухомого вектора струму дорівнюють:

$$\underline{I}_f = I_{xf} + jI_{yf} = I \cdot e^{j\varphi_i} = \underline{I}_r(nT) \cdot e^{-j\omega_0 nT} = \\ = [I_{xr}(nT) + jI_{yr}(nT)] \times \\ \times [\cos(\omega_0 nT) - j \cdot \sin(\omega_0 nT)]; \quad (13)$$

$$I_{xf} = I_{xr}(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT) + I_{yr}(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT); \quad (14)$$

$$I_{yf} = I_{yr}(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT) - I_{xr}(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT). \quad (15)$$

Залежності (5)–(8), (11), (12), (14), (15) дозволяють обчислювати проекції фазових векторів напруг та струмів електромережі за дискретними відліками миттєвих значень. Залежності легко алгоритмізуються і можуть бути реалізовані програмно. До обмежень одержаних результатів слід віднести ігнорування вищих гармонік напруг та струмів, що вносить невизначеність у результати вимірювань.

IV. Висновки та напрямок подальших досліджень

В результаті встановлена можливість обрахування проекцій на комплексні осі нерухомого фазового вектора за дискретними відліками миттєвих значень струмів та напруг електромережі. Це дозволяє програмно обробляти значення, які видаються АЦП у складі вимірювального перетворювача режимних параметрів електромережі. В ході подальших досліджень доцільно розробити технічне рішення для аналізу стану електромережі на основі фазових векторів.

Перелік посилань

[1] Pazderin, A., Zicmane, I., Senyuk, M., Gubin, P., Polyakov, I., Mukhlynin, N., Safaraliev, M., & Kamalov, F. (2023). Directions of Application of Phasor Measurement Units for Control and Monitoring of Modern Power Systems: A State-of-the-Art Review. Energies, 16(17), 6203. https://doi.org/10.3390/en16176203

[2] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2024). IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems in IEEE Std C37.118.2-2024 (Revision of IEEE Std C37.118.2-2011). https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2024.10794635

[3] Deepa, B., Hampannavar, S. & Mansani, S. (2024). Phasor estimation using micro-phasor measurement unit (μPMU) in distribution network for situational awareness. Journal of Electrical Systems and Inf Technol, 11(52). https://doi.org/10.1186/s43067-024-00179-5

[4] Ma, N., Xie, X., Dong, W., & Li, H. (2025). Wideband Dynamic Monitoring and Control System for Power Systems with High Penetration of Renewable Energy and Power Electronics. Sustainability, 17(18), 8334. https://doi.org/10.3390/su17188334

[5] Thilakarathne, C., Meegahapola, L., Fernando, N. (2020). Real-time voltage stability assessment using phasor measurement units: Influence of synchrophasor estimation algorithms. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 119, 105933. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105933

MCIT Modeling, control & information technologies

Експериментальне та комп'ютерне моделювання роботи трикутного водозливу

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.022

Оксана Галич
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
o.o.halych@nuwm.edu.ua

Максім Бєдний
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
biednyi_vg24@nuwm.edu.ua

Анотація — **Описуються приклади широкого використання трикутних вимірювальних водозливів для визначення води в гідроенергетиці та в інших областях, пов'язаних з обліком води. Порівнюються результати експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання роботи трикутних водозливів.**

Keywords — моделювання; трикутний водозлив, лабораторна установка; тарування; HEC-RAS.

I. Вступ

Водозливи є одним із найпоширеніших гідротехнічних елементів, які застосовуються для вимірювання витрати води, регулювання рівня та керування потоками в руслах, каналах і на гідротехнічних спорудах. Серед них особливе місце займають трикутні (V-подібні) водозливи, які завдяки простоті конструкції, високій точності вимірювань у широкому діапазоні витрат і зручності експлуатації широко використовуються у лабораторній практиці, гідроенергетичних об'єктах, меліоративних спорудах та системах технічного водопостачання [1-2]. Трикутні водозливи застосовуються, у таких випадках: як стандартні вимірювальні пристрої в лабораторних гідравлічних дослідженнях та калібруваннях; у полярних чи обмежених умовах, де простий водозлив із прямокутним профілем дає великі погрішності на малих витратах; в інженерних системах контролю і моніторингу стоку на дамбах, каналах або в системах управління дощовими стоками; в екологічних і «зеленої інфраструктури» рішеннях, де часто необхідно точно вимірювати малий або змінний стік води з поверхонь. Вивчення процесів течії через трикутні водозливи має важливе значення для визначення гідравлічних характеристик потоку, удосконалення методів вимірювання витрат та оптимізації конструктивних параметрів гідротехнічних систем.

Проте, при реальному застосуванні часто виникають складнощі [3]: вплив гідравлічних умов підходу (наприклад, профіль потоку, турбулентність), ефект «прилипання» струменя або несприятливі граничні умови можуть змінювати характер потоку через водозлив. Як наслідок, коефіцієнт витрати водозливу може значно відхилятися від теоретичних значень.

У такому випадку експериментальне та комп'ютерне моделювання роботи трикутного водозливу набуває особливої важливості. Експериментальні дослідження дозволяють отримати реальні дані про поведінку потоку, вимірювання напору на водозливі, діючі витрати та турбулентність. З іншого боку, комп'ютерні моделі дають можливість досліджувати широкий спектр геометричних та гідравлічних варіантів трикутних водомірів без затрат на дорогі лабораторні установки, проводити аналіз чутливості параметрів, оптимізувати конструкцію та прогнозувати поведінку водозливу в умовах, що важко реалізувати експериментально. Таким чином, поєднання експериментального підходу і комп'ютерного моделювання є ключовим для:

1. Отримання надійних даних для калібрування емпіричних формул і моделей

2. Вивчення поведінки водозливу при варіаціях геометричних і гідравлічних параметрів

3. Оптимізації конструктивних елементів водозливу.

4. Підвищення точності вимірювань витрат у реальних інженерних системах

5. Прогнозування динаміки потоку під змінними умовами та забезпечення надійної роботи водопровідних систем.

II. Експериментальні дослідження роботи трикутного водозливу

Експериментальні дослідження роботи трикутного водозливу проводилися в лабораторії кафедри енергетики Національного університету та природокористування на установці довжиною 2 м, шириною 0,3 м, висотою 1 м (рис. 1).

Дослідження проводять в наступній послідовності:

1. При відсутності подачі води на установку вимірюється відлік нуля водозливу за допомогою рівнеміра.

2. На установку подається певна витрата води Q, як правило мінімальна.

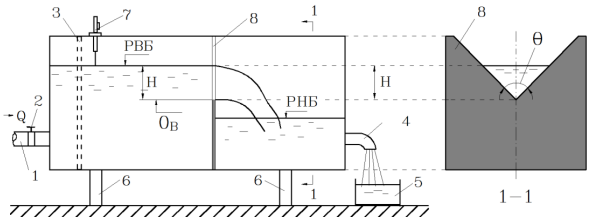


Рисунок 1. Схема експериментальної установка трикутного вимірювального водозливу: 1 - підвідна труба для подачі витрати, 2 - вентиль для регулювання витрати, 3 - решітка, 4 – патрубок для відводу труби, 5 - вимірюваний бак, 6 - опори, 7 - рівнемір 8 - трикутний водозлив

3. Після встановлення на установці усталеного режиму руху води, знімається відлік рівня верхнього б'єфу.

4. Одночасно потік води направляється у вимірювальний бак з фіксованим об'єм W та визначається час його наповнення t.

5. Після закінчення вимірювання при одній витраті, її збільшують і повторюють вищезазначені дії декілька разів.

Для отримання експериментальної залежності $Q_{ек} = f(H)$ (рис. 2) визначають напір H на водозливі та витрату Q.

$$H = \downarrow РВБ - \downarrow 0_B, \quad (1)$$

де $\downarrow РВБ$ – відмітка рівня верхнього б'єфу, $\downarrow 0_В$ – відмітка порогу (нуля) водозливу.

$$Q = \frac{W}{t}, \quad (2)$$

де W – фіксованим об'єм вимірювального баку, t – час наповнення вимірювального баку.

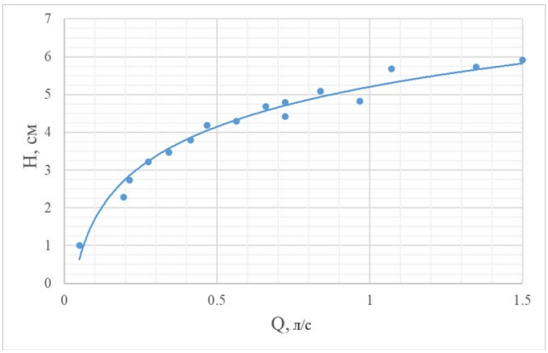


Рисунок 2. Крива зв'язку Q=f(H), отримана експериментальним шляхом

III. Комп'ютерне моделювання роботи трикутного водозливу

Для комп'ютерного моделювання роботи трикутного водозливу використовується 1D модель у відкритому програмному забезпеченні HEC-RAS у такій послідовності [4]:

1. Створюється геометрія установки (рис. 2).

2. Задаються початкові умови.

3. Здійснюється моделювання та аналізуються дані (рис. 3).

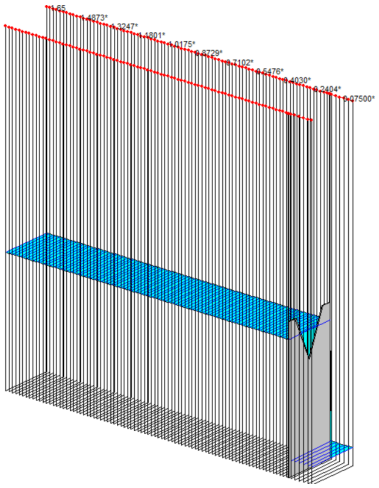


Рисунок 3. Геометрія установки в HEC-RAS

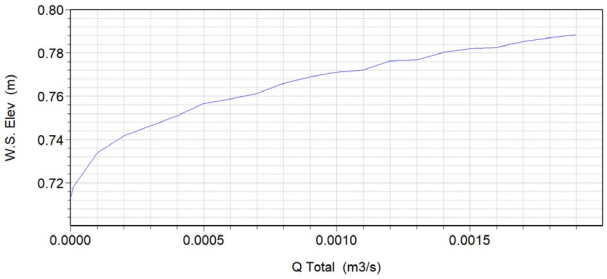


Рисунок 4. Крива зв'язку Q=f(↓РВ), отримана в програмі HEC-RAS

IV. Співставлення отриманих результатів

Для аналізу результатів експериментального та комп'ютерного моделювання співставляємо отримані криві за'язку (рис. 5).

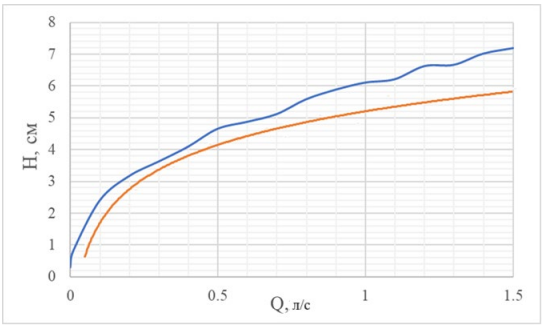


Рисунок 5. Співставлення результатів моделювання: — – експериментального, — – комп'ютерного

З рисунка 5 видно, що криві зв'язку, отримані шляхом експериментального та комп'ютерного моделювання є близькими між собою, що свідчить про правильність виконання фізичного моделювання та побудови комп'ютерної моделі.

Висновки

1. Актуальність трикутних водозливів підтверджується їх широким застосуванням

у лабораторних дослідженнях, гідроенергетиці та системах контролю стоку, оскільки вони забезпечують високу точність вимірювання витрат води у різних умовах.

2. Експериментальне дослідження дозволяє отримати реальні дані про напір і витрату води, а також оцінити вплив гідравлічних умов підходу на поведінку потоку через водозлив.
3. Комп'ютерне моделювання в HEC-RAS ефективно відтворює роботу трикутного водозливу, дозволяючи аналізувати різні геометричні та гідравлічні параметри без дорогих лабораторних експериментів.
4. Співставлення результатів експерименту та моделювання показує їх високу відповідність, що підтверджує правильність обраних методів дослідження та можливість їх використання для оптимізації конструктивних параметрів водозливів і підвищення точності вимірювань у реальних інженерних системах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Chow V.T. Open-channel hydraulics. 1959. 680 p.

[2] Shen J. Discharge characteristics of triangular-notch thin-plate weirs. Government Printing Office Washington, D.C. 61 ps.

[3] El Hattab M.H., Mijic A., Vernon D. Optimised Triangular Weir Design for Assessing the Full-Scale Performance of Green Infrastructure. Water 2019, 11, 773.

[4] HEC-RAS. User's Manual.
https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest.

Тарування трапецієвидного водоміру за допомогою HEC-RAS

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.023

Оксана Галич
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
o.o.halych@nuwm.edu.ua

Роман Данильчук
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
danylchuk_vg24@nuwm.edu.ua

Abstract—**Описується важливість проведення тарування трапецієвидних водомірів, методи тарування та складність їх проведення. На противагу лабораторному тарируванню розглядається можливість отримання тарувальної кривої за допомогою програми HEC-RAS.**

Keywords—моделювання, тарування, HEC-RAS, 1D модель, трапецієвидний водомір

I. Introduction

В умовах сучасного водогосподарської та гідроенергетичної діяльності точне вимірювання витрат відкритого каналу становить одну з важливих задач. Один із ефективних засобів – використання трапецієвидних водозливів (вимірювальних водомірів) – це водозлив в тонкій стінці з трапецієвидним поперечним перерізом, призначений для вимірювання витрат у відкритому каналі [1]. Серед переваг таких водомірів – можливість роботи на різному діапазоні витрат, порівняно низький гідравлічний опір тощо. Проте, щоб отримати дійсно точні показники витрати, необхідне тарування (калібрування) трапецієвидного водоміру, тобто встановлення емпіричної або наперед заданої залежності між вимірюваним напором на порозі водозливу (H) і витратою води (Q). Недостатнє чи відсутнє тарування може призвести до значних помилок, що неприпустимо для лабораторних досліджень, гідроенергетичних систем або контролю витрат.

Метою цієї статті є вивчення традиційних методів тарування трапецієвидного водоміру та за допомогою програмного забезпечення HEC-RAS.

II. Необхідність тарування трапецієвидних водомірів

Трапецієвидний водомір працює за принципом критичного потоку. Він звужує поперечний переріз каналу, створюючи контрольну ділянку, де потік переходить від спокійного до бурхливого потоку. Витрата через отвір залежить головним чином від напору води на порозі водоміру (рис. 1). Теоретична залежність витрати води від напору зазвичай виражається як:

$$Q = 1{,}86BH^{3/2}, \quad (1)$$

де B – ширина трапецієвидного водозливу, H – напір на трапецієвидному водозливі, 1,86 – коефіцієнт, який враховує форму та гідравлічні умови водоміру.

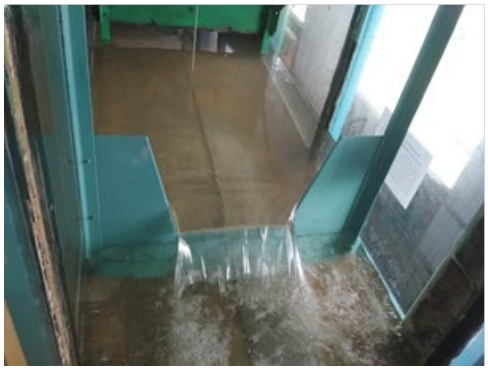


Рисунок 1. Фото трапецієвидного водоміру

Хоча теоретичні коефіцієнти водозливу можна оцінити за допомогою різних розрахункових рівнянь [1-4], реальні фактори, такі як шорсткість, будівельні допуски та неоднорідність потоку на підході, вимагають емпіричного тарування.

Основні причини для тарування водомірів [4]:

1. Геометричні відхилення: навіть невеликі помилки виробництва або монтажу (наприклад, кути стін, ширина отвору або похил дна установки) змінюють ефективну площу та енергетичний напір, змінюючи коефіцієнт витрати.

2. Гідравлічні умови: наближення потоку, турбулентність, ефект підпору або спаду та накопичення осаду впливають на виміряний напір.

3. Вимоги до точності: у лабораторних дослідженнях похибка вимірювання понад ±5 % може бути неприйнятною; тарувані лотки можуть досягати точності в межах ±2 %.

4. Емпіричне підтвердження: тарування гарантує, що теоретичне співвідношення між витратою та напором відображає фактичну водопропускну здатність водозливу.

III. Методика тарування в лабораторних умовах

A. Підготовка установки:

Встановлення водозливу у лоток чи канал з достатньою прямолінійністю підходу: довжина підходу за рекомендаціями для зменшення вихрових ефектів.

Встановлюють датчики рівня та еталонний вимірювальний пристрій витрати (наприклад, бак або пропуск через еталонний витратомір).

B. Проведення серії випробувань:

Пропускають серію дискретних витрат через водомір, встановлюючи на кожному витраті стаціонарний режим (постійний напір *H*).

Після стабілізації потоку вимірюють напір на порозі водозливу

Повторюють описані дії для кількох значень витрат (наприклад, 8–12 або більше) від мінімального до максимального очікуваного діапазону витрати.

C. Побудова кривої зв'язку:

На графік наносять отримані точки та зазвичай апроксимують у вигляді вітки параболи.

Визначають емпіричні коефіцієнти (наприклад через метод найменших квадратів) та оцінюють похибку. Аналізують ділянки, де кривизна або зміна чутливості змінилась, можуть вводити табличні коефіцієнти.

IV. Отримання тарувальної кривої трапецієвидного водоміру за допомогою програми HEC-RAS

При таруванні трапецієвидного водоміру лабораторних умовах слід враховувати такі фактори:

Нерівномірність підходу потоку: вихрові або нерівні профілі швидкості можуть спотворити вири.

Осад або наліпання на дні каналу: змінюють ефективний переріз, впливають на глибину та швидкість потоку.

Підтоплення: при підвищеному рівні в НБ контроль критичної ділянки може бути втрачений, і залежність Q=f(H) зміниться.

Монтаж і геометрія: відхилення від проектної геометрії (наприклад, похил дна, кривизна стінок можуть потребувати нового тарування або застосування корекцій.

Враховуючи перераховані складнощі, в умовах широкого використання комп'ютерного моделювання була виконана спроба отримати тарувальну криву трапецієвидного водоміру в середовищі HEC-RAS [5]. Для цього було створено геометрію існуючої лабораторної установки, довжиною 10 м, висотою робочої області 1,2 м та шириною 1,0 м (рис. 2 та 3).

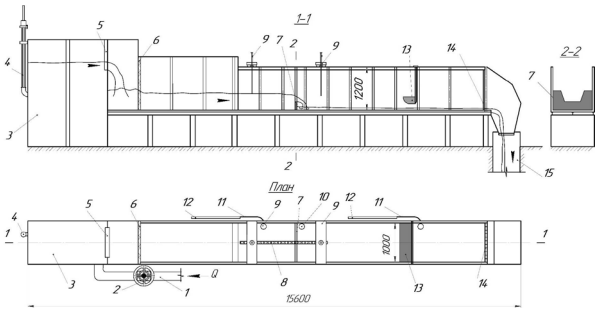


Рисунок 2. Схема експериментальної установки: 1 – підвідний трубопровід, 2 – засувка, 3 – голова лотока, 4 – п'єзометр для визначення напору на водозливі, 5 – вимірювальний трикутний водозлив, 6 – заспокійлива решітка, 7 – трапецевидний мірний водозлив, 8 – місце розташування отворів п'єзометрів, 9 – шпітценмасштаб, 10 – отвори для відводу гумових трубок від отворів п'єзометрів до щита, 11 – гумові трубки, 12 – щит з п'єзометрами, 13 – затвор для регулювання глибини в лотоку, 14 – дерев'яні, бруски, 15 – резервуар для відведення води

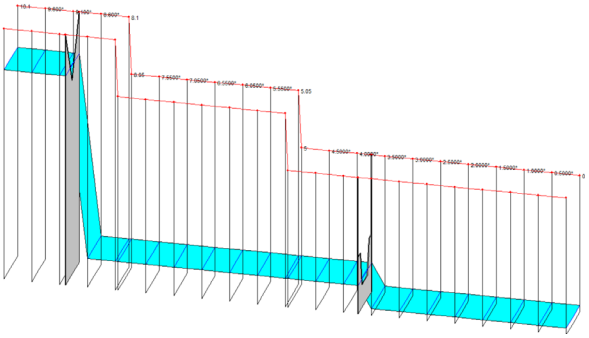


Рисунок 3. Модель установки створена в HEC-RAS

Задавалися значення витрати Q = 2,0…60,0 л/с та граничні умови.

Далі виконувався аналіз стаціонарного потоку.

В результаті була отримана тарувальна крива або крива зв'язку Q=f(H) (рис. 4).

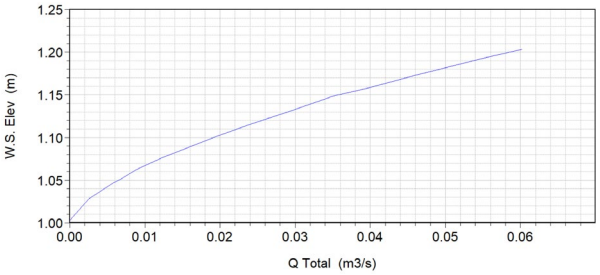


Рисунок 4. Тарувальна крива, отримана за допомогою комп'ютерного моделювання в програмі HEC-RAS

V. Висновки

1. Тарування трапецієвидного водоміру – це обов'язковий етап для забезпечення достовірного вимірювання витрати у відкритому каналі, особливо коли йдеться про лабораторні дослідження або критичні гідроенергетичні застосування.

2. Правильно виконане калібрування дозволяє зменшити систематичну похибку, впевнено використовувати водомір у заданому діапазоні витрат, врахувати вплив геометрії, монтажу та гідравлічних умов на вимірювання.

3. Недотримання процедури тарування або спроба користуватись водоміром без перевірки можуть призвести до значних помилок, що в подальшому вплинуть на результати досліджень чи облік витрат.

4. Можливості сучасних комп'ютерних програм дозволяють їх використовувати і для отримання тарувальних кривих трапеціївидних водомірів.

5. Тарувальна крива Q=f(H), отримана шляхом компютерного моделювання в програмі HEC-RAS має задовільний характер.

REFERENCES

[1] Chow V.T. Open-channel hydraulics. 1959. 680 p.

[2] ISO 4359:2022 Flow Measurement in Open Channels Using Flumes.

[3] Hively W.D., McCarty G.W., Angier J.T., Geohring L.D. Weir design and calibration for stream monitoring in a riparian wetland. Hydrologic science and technology. 2006, v. 22, no. 1-4 p.71-82.

[4] Hyat M.L. Design, Calibration, and Evaluation of a Trapezoidal Measuring Flume by Model Study. Reports 1965. 386 ps.

[5] HEC-RAS. User's Manual.
https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest.

Удосконалення лабораторної установки для досліджень гвинтових турбін шнекового типу в малій гідроенергетиці

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.024

Олександр Герба
Національний університет водного господарства
та природокористування, Рівне
o.v.herba@nuwm.edu.ua

***Анотація* — У статті представлено результати модернізації лабораторної установки для дослідження гвинтових турбін шнекового типу, що застосовуються в малій гідроенергетиці. Створено універсальний випробувальний комплекс, який дозволяє моделювати різні режими потоку, виконувати вимірювання гідравлічних і електричних параметрів ручними та автоматизованими способами, а також досліджувати вплив кута подачі потоку на ефективність турбін. Описано конструктивні вдосконалення: розробку направляючої системи потоку, впровадження SCADA-контролю, блока регульованого навантаження генератора та двоканальних систем вимірювання основних параметрів. Результати дослідження засвідчили підвищення стабільності гідравлічного режиму на 20 % та зниження сумарної похибки вимірювань до 3 %. Оновлена установка може використовуватись як науково-навчальна платформа для експериментальних досліджень у сфері малої гідроенергетики.**

Ключові слова — мала гідроенергетика, гвинтова турбіна, шнекова турбіна, лабораторна установка, SCADA, 3D-друк, гідродинаміка.

I. Вступ

Мала гідроенергетика є перспективним напрямом відновлюваної енергетики, оскільки дозволяє використовувати потенціал малих річок без суттєвого впливу на екосистему. Гвинтові турбіни шнекового типу ефективно працюють при малих напорах (1–5 м) та низьких витратах води, однак їх дослідження вимагає експериментальних стендів, здатних точно відтворювати реальні гідродинамічні умови.

Більшість існуючих лабораторних установок не забезпечують комплексної реєстрації параметрів потоку, що ускладнює аналіз ефективності турбін. Тому актуальним є створення модернізованого лабораторного стенду з автоматизованими системами вимірювання, контролю та регулювання потоку.

Мета дослідження — удосконалення лабораторної установки для дослідження гвинтових турбін шнекового типу шляхом впровадження направляючої системи, подвійних вимірювальних модулів і автоматизованого контролю SCADA.

II. Конструкція лабораторної установки

Лабораторна установка (рис. 1) виконана у вигляді дзеркального лотка прямокутного перерізу довжиною 15,6 м, обладнаного напірним баком, системою рециркуляції та блоком автоматизації [1]. Конструкція включає три секції:

- напірна частина з водозливом;
- зона стабілізації потоку з решітками;
- робоча зона з випробувальним модулем.

Подача води здійснюється через насосну систему, а витрата визначається за допомогою трикутного водозливу з п’єзометром та вираховується за формулою Томсона при куті вирізу 90°[2]:

$$Q=1{,}4H^{2.5}$$

де: H - висота шару води над порогом трикутного водозливу

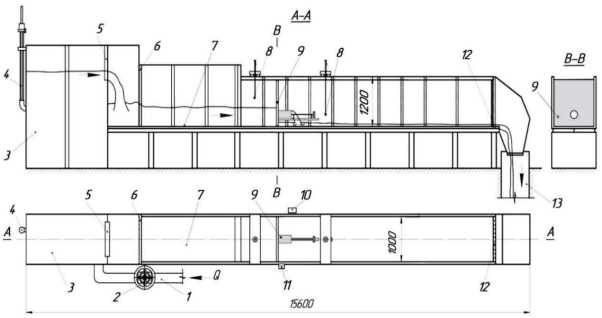


Рис. 1. Функціональна схема лабораторної установки: 1 – підвідний трубопровід, 2 – засувка, 3 – голова лотка, 4 – п'єзометр для визначення напору на трикутному водозливі, 5 – вимірювальний трикутний водозлив, 6 – заспокійлива решітка, 7 – лотік лабораторної установки, 8 – датчики рівня води та шпіцен масштаби, 9 – випробувальний модуль для досліджень, 10 – щит автоматизації, 11 – блок керування навантаженням, 12 – шпицевий затвор, 13 –резервуар для відведення води [3]

Особливістю конструкції є можливість регулювання рівня води у верхньому б’єфі за допомогою засувки та контрольованого зміщення заслінки потоку. Це забезпечує формування ламінарного режиму течії та створює стабільні умови для вимірювання характеристик турбін.

III. Випробувальний модуль та система вимірювань

Випробувальний модуль створений як універсальний вузол для дослідження різних типів турбін (спіралеподібних, гвинтових, шнекових). Його конструкція забезпечує легку зміну моделей, співвісне розміщення генератора та ротора, а також мінімальні втрати енергії при передачі крутного моменту.

На рис. 2 схематично показано всі складові випробувального модуля для дослідів турбін у водному потоці, де вода з резервуара подається насосною системою в лотік лабораторної установки 1, де створюється водний потік з певною швидкістю. Заслінка водяного потоку 4 забезпечує контрольоване збільшення рівня води h в верхньому б'єфі, що контролюється датчиками [68] та шпіцен-масштабом 2 і відповідними позначками на заслінці. Досліджувана турбіна 6 встановлюється в шахті 5, і вода проходить через її лопаті, змушуючи їх обертатися. Обертовий рух від турбіни за допомогою направляючого валу 12, з'єднаного муфтою 8, передається на генератор 13. Вироблена напруга та оберти генератора через провідник 11 передаються на контролер в щит автоматизації 9 та блок керування навантаженням 15. Датчики також передають сигнал на контролер у щит автоматизації та фіксують важливі параметри роботи турбіни: кількість обертів, напругу без навантаження, напругу під навантаженням, рівні води в верхньому та нижньому б'єфах [4].

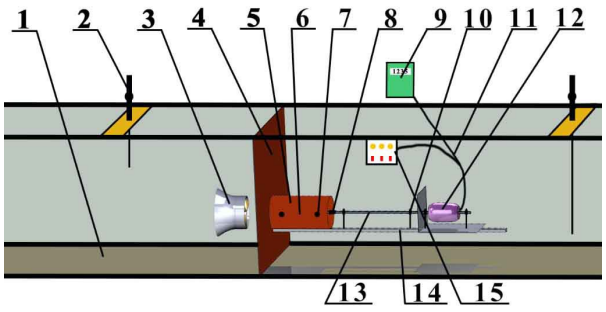


Рис. 2. Схема випробувального модуля для дослідів у водному потоці: 1 – лотік лабораторної установки; 2 – датчик та шпіцен-масштаб, для зняття показників рівня води; 3 – направляюча потоку перпендикулярно лопатям турбін; 4 – заслінка водяного потоку; 5 – направляюча камера потоку (шахта); 6 – досліджувана турбіна; 7 – кріплення турбіни з підшипником; 8 – монтажна муфта; 9 – щит автоматизації; 10 – кріплення направляючого валу з підшипником; 11 – провідник; 12 – генератор; 13 – направляючий вал; 14 – монтажна направляюча; 15 – блок керування навантаженням [4].

Лабораторну установку з дослідження турбін обладнано щитом автоматизації з контролером, який:

- вимірює рівень рідини до і після експериментального стенду [5];

- вимірює кількість обертів турбіни з генератором;

- відображає мнемосхему експериментальної установки в режимі реального часу;

- вимірює величину виробленої електричної напруги в різних режимах навантаження та рівнях води у верхньому б'єфі;

- відображає отримані дані в графічному вигляді та записує в архів отримані результати.

Для автоматизації процесу вимірювання вищезазначених параметрів розроблено автоматичний контролер [6], який складається з:

- програмованого логічного контролера Siemens CPU 1215C;

- модуля розширення аналогових входів SM 1231 AI8x13 BIT;

- давача тиску bd sensors lmp 808;

- перетворювач імпульсів датчика Холла з генератора, реалізований на основі ARDUINO NANO;

- давача дифузного та світло відбиваючого режимів Pepperl + Fuchs UB800-18GM40-I-V1;

- HMI панелі Schneider Electric HMIET6500.

Автоматизований контроль параметрів у лабораторній установці здійснюється за такою схемою: під час зміни рівня води датчик, підключений до аналогового входу модуля розширення, передає сигнал 4–20 мА пропорційно відстані до поверхні води. Контролер зчитує його на вході %IW102, перетворює у цифрове значення та масштабує у блоці FC1 відповідно до діапазону вимірювань. Рівень води визначається як різниця між початково заміряною відстанню до дна лотка та поточним показом датчика.

Швидкість обертання ротора вимірюється за допомогою датчика Холла, вбудованого в генератор. Він формує 30 імпульсів на один оберт, які надходять до мікроконтролера Arduino Nano. Пристрій перетворює імпульси у напругу 0–5 В, що подається на аналоговий вхід контролера PIW0 для обчислення частоти обертання.

Напруга генератора вимірюється аналоговим датчиком, підключеним до входу PIW2. Сигнал з однієї фази проходить через трансформатор, нормалізується та масштабується у контролері, після чого цифрове значення використовується для аналізу ефективності роботи турбіни.

Для додаткового обчислення витрати води був використаний попередній розрахунок, який включав в себе визначення площі перерізу направляючої камери потоку і швидкості водного потоку. Використання математичних формул дозволило точно визначити витрату води в експериментальних умовах [7].

Визначення витрати води. Основною формулою для обчислення витрати водив програмному середовищі має вигляд [8]:

$$Q_1=S_kv$$

де:

- Q_1 – визначена за допомогою програмного забезпечення, м³/с;
- S_k – площа перерізу направляючої камери потоку, (м²);
- v – швидкість водного потоку, (м/с).

Для забезпечення більш глибокого та всебічного аналізу вихідних показників, що виробляються генератором, у блоці керування навантаженням було здійснено поетапне збільшення навантаження. З цією метою до схеми підключено три ідентичні лампи розжарювання (див. рис. 3) загальною номінальною потужністю 63 Вт (3 лампи х 21 Вт кожна). Така конфігурація дозволила отримати вимірювання в чотирьох чітко визначених режимах: без навантаження (холостий хід) та при трьох різних рівнях навантаження, що сприяє комплексному дослідженню електричних характеристик генератора в широкому діапазоні робочих умов [4].

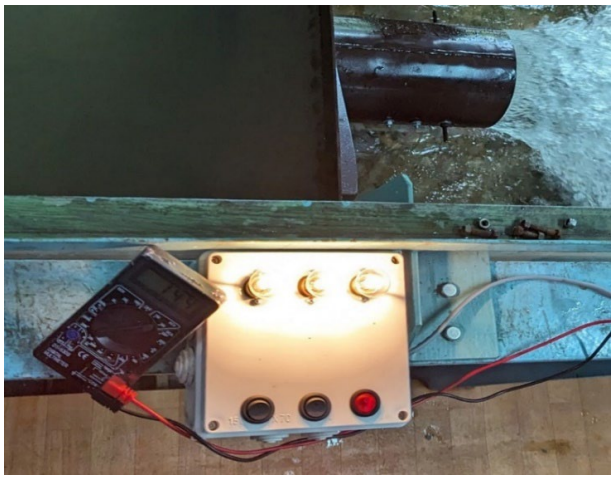


Рис. 3. Зовнішній вигляд блоку з електричним навантаженням

Конструкція випробувального модуля узгоджена з габаритами лотка лабораторної установки та забезпечує вимірювання рівня води у верхньому б'єфі в шести фіксованих точках, що дозволяє визначати робочі межі експериментів. Контрольні точки розташовані вертикально відносно верхньої кромки заслінки подачі потоку, при цьому нульова відмітка фіксується перпендикулярно до осі, що проходить через центр направляючої шахти потоку, як показано на рис. 4.

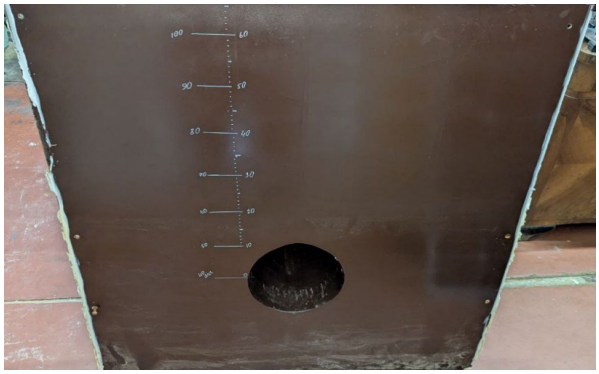


Рис. 4. Зовнішній вигляд випробувального модуля з контрольними позначками рівня води у верхньому б'єфі

Таке розташування забезпечує достатній простір для генератора над рівнем нижнього б'єфу, запобігає контакту електрообладнання з водою, знижує ризик затоплення та полегшує обслуговування. Конструкція також спрощує монтаж і заміну моделей турбін, що важливо для частих експериментів і навчальних завдань [4].

Для перевірки достовірності даних використано два паралельних методи вимірювання — автоматизований (контролер + SCADA) та ручний (прилади прямої дії). Це дозволяє верифікувати результати та визначати похибку вимірювань з точністю до 2 %.

IV. Направляюча потоку

Для формування стабільного потоку під кутом 90° до лопатей турбін розроблено направляючу потоку, виготовлену методом 3D-друку з полімерного композиту (рис. 5). Конструкція має звужувальний профіль — від вхідного діаметра 0,315 м до вихідного 0,21 м, що забезпечує ефект стискання струменя та підвищення швидкості потоку [4].



Рис. 5. Вигляд направляючої потоку з двох сторін

Базуючись на принципах гідродинамічної гармонізації, направляюча мінімізує втрати енергії, турбулентність і нерівномірність швидкостей, що підвищує точність і стабільність експериментів. Її форма дозволяє регулювати напрямок і рівномірність потоку, створюючи відтворювані гідродинамічні умови для дослідження.

Як показано на рис. 6, направляюча має дзеркально симетричні криві відносно лопатей турбіни, що забезпечує плавне перенаправлення потоку й зменшення турбулентності. Збільшений вхідний діаметр (d_0 = 0,315 м), який звужується до d_c = 0,2095 м, створює ефект стиску струменя, формуючи рівномірний розподіл швидкості та тиску [4].

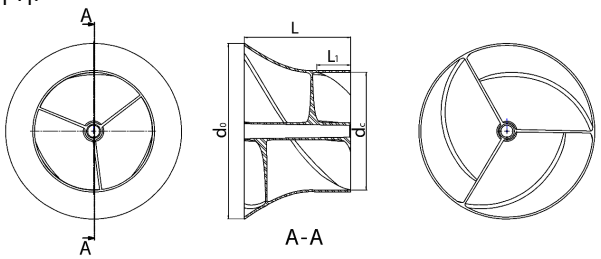


Рис. 6. Схема пристрою для спрямування потоку

Коефіцієнт стиску визначається як:

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_0} = \left(\frac{d_c}{d_0}\right)^2$$

а витрата Q_2 через направляючу [8]:

$$Q_2 = \mu S_0 \sqrt{2gh}$$

де μ=0,60–0,61 – коефіцієнт витрати.

Таким чином, розроблена направляюча забезпечує плавне стиснення та стабільність потоку, знижує втрати енергії та створює контрольовані умови для дослідження ефективності гвинтових турбін.

V. Виготовлення експериментальних турбін

Для досліджень у розробленому випробувальному модулі створено п'ять експериментальних моделей турбін: три спіралеподібні, одну гвинтову та одну класичну шнекову.

3D-моделі розроблено в програмному середовищі Blender, а виготовлення здійснено методом 3D-друку на принтері Anycubic Kobra Max, що забезпечило високу точність геометрії та повторюваність форм.

Усі моделі мають уніфіковані розміри — діаметр 200 мм, довжина 210 мм, і виконують 0,75 оберта лопаті, що дозволяє проводити порівняльні випробування за однакових гідравлічних умов.

Випробувальний модуль забезпечує можливість тестування таких моделей турбін, а також інших варіантів з аналогічними габаритами, виготовлених методом 3D-друку, із можливістю швидкої заміни для серійних експериментів [4].

VI. Результати та висновки

Модернізована лабораторна установка отримала комплекс технічних удосконалень, що істотно підвищили її точність, стабільність і функціональні можливості.

Запроваджено подвійні (ручні та автоматизовані) системи вимірювання основних параметрів, що дозволяє здійснювати взаємну перевірку та підвищити достовірність отриманих результатів.

Вимірювальні системи:

- Рівень води у верхньому (напір) та нижньому б'єфах контролюється п'єзометричними шкалами і ультразвуковими датчиками, підключеними до контролера, що забезпечує автоматичну реєстрацію показників і контроль стабільності напору.
- Оберти ротора вимірюються ручним тахометром і датчиком Холла, інтегрованим у SCADA - систему, яка здійснює збір, архівацію та аналіз даних у реальному часі.
- Напруга генератора контролюється мультиметром і аналоговим модулем SM 1231, що дозволяє відстежувати зміну напруги й потужності під час експериментів.

Для моделювання різних режимів роботи турбіни використано регульований блок навантаження, що складається з трьох ідентичних ламп розжарювання загальною потужністю 63 Вт (3 × 21 Вт) та опором 82,29 Ом (3 × 27,43 Ом)). Це дає змогу відтворювати режими від холостого ходу до повного навантаження генератора.

Витрата води визначається двома методами — непрямим (об'ємним) і гідравлічним, що дає можливість контролювати її в реальному часі.

Направляюча система з регульованою геометрією забезпечує зміну швидкості та кута атаки, формуючи стабільний потік під кутом 90° відносно лопатей, що дозволяє моделювати різні режими течії.

Межі експериментів:

- максимальна витрата — 0,160 м³/с;
- діапазон напорів — 0,2 – 0,6 м;
- максимальне навантаження — 63 Вт.

Після модернізації установка забезпечує:

- одночасний контроль п'яти ключових параметрів (рівень, витрата, оберти, напруга, навантаження);
- стабільну роботу при змінних напорах;
- інтеграцію з SCADA-системою для збору, архівації та аналізу даних;
- зниження сумарної похибки вимірювань до 3 %;
- формування керованого гідродинамічного середовища для відтворення різних режимів течії.

Узагальнення результатів.

Застосування направляючої системи потоку забезпечило рівномірність та стабільність гідравлічного режиму приблизно на 20 % у порівнянні з базовою конструкцією.

Оновлена установка стала універсальною експериментальною платформою для дослідження гвинтових, шнекових і спіралеподібних турбін різних геометрій.

Вона придатна для наукових, навчальних і практичних цілей, сприяє розвитку експериментальної бази малої гідроенергетики України та впровадженню інноваційних технологій у сферу відновлюваної енергетики.

Література

[1] Рябенко О. А. Хвилястий стрибок : монографія. Рівне : НУВГП, 2022. 277 с.

[2] Рябенко О. А., Галич О. О. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Методи та прилади візуалізації течії» студентами спеціальності 145 «Гідроенергетика» усіх форм навчання. Рівне : НУВГП, 2017. 37 с. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/8043/1/01-06-27.pdf (дата звернення: 08.10.2025)

[3] Рябенко О. А., Сунічук С. В., Галич О. О., Зайчук Р. М. Науково-технічний супровід експлуатації ГТС ГЕС Дніпровського та Дністровського каскадів : звіт з науково - дослідної роботи № 1504/24; № 2–179. 65 с.

[4] Герба О.В. Удосконалення умов роботи та конструкцій гідравлічних турбін шнекового типу малих гідроелектростанцій. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії, НУВГП, Рівне, 2025.

[5] Description of Ultrasonic sensor UB800-18GM40-I-V1 : вебсайт. URL: http://surl.li/yrzydu (дата звернення: 08.10.2025).

[6] Сафоник А. П., Таргоній І. М., Пилипенко В. М.. Розробка системи моніторингу та контролю процесу відведення фільтраційних вод від земляних гребель. MCIT-2024. Моделювання, керування та інформаційні технології : VII Міжнародна науково-практична конференція 7–9.11.2024, м. Рівне. URL: DOI:10.31713/MCIT.2024.112. (дата звернення: 08.10.2025).

[7] Letcher T. Comprehensive Renewable Energy. 2nd Edition. February 22, 2022. 5196 p. URL: https://shop.elsevier.com/books/comprehensive-renewable-energy/letcher/978-0-12-819727-1 (дата звернення: 08.10.2025).

[8] Федорець В. О., Педченко М. Н., Федорець О. О. Технічна гідромеханіка. Гідравліка та гідропневмопривод : підручник. Житомир : ЖІТІ, 1998. 412 с.

Проєктування поліпшеної архітектури LSTM та XGBoost для контекстно-орієнтованого виявлення аномалій у журналах подій на основі CPU

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.025

Дмитро Гнатюк

Черкаський національний університет
ім. Богдана Хмельницького
Черкаси, Україна
hnatiuk.dmytro1123@vu.cdu.edu.ua

Abstract — Традиційні системи моніторингу IT-інфраструктури не враховують контекстні зв'язки між подіями у журналах подій, що призводить до високого рівня хибних спрацювань (до 60-80%). У роботі пропонується інноваційна гібридна архітектура через поєднання семантичного розуміння послідовностей (LSTM) з точністю табличної класифікації (XGBoost). Основна ідея полягає у створенні "семантичного відбитка" історії подій для кожного сервісу. Очікувані експериментальні результати мають показати покращення оцінки F1 на 15-25% при збереженні низької латентності (<50ms) при роботі виключно на CPU.

Keywords— ***виявлення аномалій в журналах подій; LSTM; XGBoost; CPU оптимізація та адаптивні пороги***

I. ВСТУП

Сучасні розподілені системи генерують величезні обсяги журналів подій, аналіз яких є критично важливим для забезпечення стабільності та безпеки IT-інфраструктури. Традиційні підходи до виявлення аномалій часто не враховують контекстну інформацію та семантичні зв'язки між подіями, що призводить до високого рівня хибних спрацювань.

Представлена робота пропонує архітектурне рішення, яке поєднує переваги рекурентних нейронних мереж для аналізу послідовностей з ефективністю градієнтного бустингу для табличних даних. Система розроблена з урахуванням обмежень реальних production-середовищ, де GPU-ресурси можуть бути недоступними.

II. АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ

Вдосконалена система виявлення аномалій у журналах подій побудована за принципом багатоетапної обробки даних з гібридним підходом до аналізу. Загальна архітектура складається з двох основних потоків: послідовного аналізу службових повідомлень (метод LSTM) для розуміння семантичного контексту та табличного аналізу вектору отриманої інформації зі службових повідомлень (метод XGBoost) для точної класифікації ознак на основі статистичних даних [1].

A. Ключові компоненти:

1. Log Ingestion & Parsing: обробка потоку журналів подій у різних форматах з підтримкою JSON, syslog та кастомних форматів.
2. Normalization & Masking: заміна змінних елементів на стандартизовані токени (IP → `<IP>`, числа → `<NUMBER>`). Очікується зменшення кількості унікальних токенів на 60-80%.
3. Context Window Management: створення ковзних вікон з 32-64 послідовних записів, адаптивний розмір залежно від частоти генерації журналів подій.
4. LSTM Sequence Encoder: Перетворення послідовностей токенів у векторні представлення з attention pooling та CPU-оптимізацією.
5. Feature Engineering: генерація додаткових ознак у чотирьох категоріях: часові, циклічні, категоріальні, семантичні.
6. XGBoost Classifier: фінальна класифікація на основі об'єднаного вектора [LSTM_embedding та tabular_features]

B. Архітектура енкодера Lstm

LSTM перетворює вікно послідовностей службових повідомлень із журналів подій на компактне векторне представлення (embedding), що утримує ключові семантичні зв'язки між подіями. На вхід подається ковзне вікно з 32–64 записів одного сервісу, кожен запис попередньо нормалізується та токенізується. Далі токени проєктуються в 64-вимірні вектори (embedding layer), після чого одношаровий LSTM (hidden size 64–128) послідовно обробляє їх, зберігаючи часовий

порядок і залежності. На завершальному етапі формується набір шаблонів для виявлення аномалій на основі методу тренування уваги (attention pooling), який виділяє найінформативніші записи у кожному поточному пулі векторів та формує один 64-вимірний вектор інформаційного контексту конкретного сервісу.

Отриманий «семантичний відбиток» вікна журналів подій поєднується з табличними ознаками та передається у XGBoost для остаточного рішення. Така побудова дає змогу поєднати сильні сторони обох підходів: LSTM фіксує контекст і послідовність подій у журналах подій, а XGBoost додає точність та інтерпретованість на рівні табличних ознак [2]. Для production планується використовувати INT8-квантизацію а саме 8-бітні ваги, активації з калібруванням та динамічне батчування з таймаутом ~10 мс і оптимізовані бібліотеки лінійної алгебри оптимізовані під CPU. Це зменшує пам'ять і прискорює інференс, забезпечуючи стабільно низьку затримку для більшості запитів.

C. Інженерія ознак та інтеграція з XGBoost

При обробці пропонується доповнити семантичний вектор від LSTM статистичними ознаками з журналів подій і подати об'єднаний вектор до XGBoost для остаточного рішення. Планується використовувати 4 групи ознак: часові (наприклад, error rate за 1h/24h, інтенсивність повідомлень, різноманітність шаблонів), циклічні (sin/cos часу доби та дня тижня для обліку періодичності), категоріальні (історичний anomaly rate для host_id/service_id, target encoding рівнів), а також семантичні (ентропія шаблонів у вікні та прапорець «новий шаблон»). Такий набір стисло описує динаміку, періодичність і контекст у журналах подій, зберігаючи інтерпретованість і стабільність на production-даних.

64-вимірний вектор LSTM об'єднується з табличними ознаками (часовими, циклічними, історичними профілями, а також семантичними). Об'єднаний вектор подається до XGBoost із CPU-оптимізованими налаштуваннями (tree_method='hist', помірна глибина, невелике eta, min_child_weight, subsample, colsample_bytree) для балансу точності та швидкодії.

Очікується, що запропонована гібридна модель перевершить «чистий» deep learning за точністю, поєднуючи контекст логів зі статистичними ознаками, водночас залишаючись достатньо швидкою: щонайменше 95% запитів обробляються швидше ніж за 50 мс на CPU.

III. АДАПТИВНЕ НАЛАШТУВАННЯ ПОРОГІВ ТА ПРОФІЛЮВАННЯ

Статичні пороги однаково поводяться для всіх сервісів і часто генерують зайві сповіщення. Пропонується фільтрувати кожен сервіс окремо: підтримувати ковзні статистики (середнє, стандартне відхилення, історичний коефіцієнт помилок) за його сигналами та показниками з журналів подій. На основі цих профілів формується «нормальна зона» поведінки сервісу, від якої зручно відштовхуватися при визначенні аномалій.

Пороги планується визначати адаптивно: базовий рівень задається як межа, яку не перевищує приблизно 95% нормальних значень, із додатковим запасом, що є пропорційним типовому розкиду оцінок, далі він коригується за допомогою експоненційного згладжування з обмеженням швидкості зниження, щоб уникати надмірної чутливості. Для нових або малонавантажених сервісів застосовується накопичення власної статистики. Такий підхід персоналізує аналіз та зменшує рівень хибнопозитивних результатів на 30–50% без втрати чутливості до справжніх інцидентів.

IV. ПОЯСНЮВАЛЬНІСТЬ ТА ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Для пояснюваності пропонується легкий, практичний набір механізмів: для XGBoost — feature importance (gain/cover) та SHAP-значення; для LSTM — ваги attention, що локалізують у вікні журналів подій записи, які найбільше вплинули на рішення. В сповіщеннях планується відображати оцінки моделі, 3–5 ключових ознак із їх внеском, а також приклади шаблонів із відповідного інформаційного пулу, щоб оператор швидко відтворив контекст. Така комбінація має забезпечити достатню інтерпретованість без істотних накладних витрат на CPU і зробити причини спрацювань прозорими для експлуатаційних команд.

Цільові метрики практичні: очікується приріст F1 (гармонічне середнє між точністю й чутливістю) на 15–25% відносно baseline, переважна більшість запитів (95%) обробляється швидше за 50 мс на CPU, рівень хибнопозитивних результатів <5% на сервіс, recall критичних аномалій >90% і лінійна масштабованість до ~1000 сервісів [3].

V. ОБМЕЖЕННЯ ТА ВИКЛИКИ

Запропонований підхід має низку ризиків, які планується враховувати під час експериментів і прототипування. По-перше, можливе зміщення даних між синтетичними, напівсинтетичними та production-журналами подій: розподіли шаблонів і частот можуть відрізнятися, що вплине на узагальнюваність. Для зниження ризику передбачаються регулярні перевірки стабільності (drift-моніторинг ознак та score), періодична перекалібровка та перенавчання за часово стратифікованими зрізами. По-друге, значний дисбаланс класів (1–5% аномалій) ускладнює оптимізацію — планується фокус на AUCPR (якість на дисбалансі класів), та частці коректних серед топ-N спрацювань і зваженому F1 з урахуванням дисбалансу. Також використовуємо ваги класів і тюнінг порога, щоб керовано обмінюватися між вищим recall і меншою кількістю сповіщень [4].

Окремий виклик — сталість послідовнісної моделі у розподіленому середовищі (кешування hidden-станів, відновлення після перезапусків, консистентність між інстансами) та жорсткі обмеження на затримку в CPU-середовищі. Це планується пом'якшувати через чіткий життєвий цикл станів (час життя, гарячий запуск, захист від розсинхронізації), динамічне батчування з таймаутом, стискання нейромережі до 8-бітних цілих чисел замість 32-бітних чисел з плаваючою комою, зі збереженням масштабів і нульових зсувів

та профілювання вузьких місць. Також враховується компроміс затримки проти точності: для сервісів із високими вимогами до затримки передбачається спрощена конфігурація (менші вікна, легші моделі), тоді як для критичних детекцій — більш «важкі» налаштування з пріоритетом якості.

ВИСНОВКИ

У роботі пропонується гібридна архітектура LSTM + XGBoost для контекстно-орієнтованого виявлення аномалій у журналах подій із фокусом на CPU-середовища. Ключові ідеї включають поєднання семантичного відбитка послідовності службових повідомлень з їх табличними ознаками, адаптивні пороги для виявлення аномалій та запобігання хибних спрацювань з урахуванням профілю сервісу та практичної пояснюваності (attention для LSTM і SHAP/feature importance для XGBoost). Архітектура проєктується під низьку латентність на CPU (INT8, динамічне батчування, BLAS) і очікувано підвищує F1 на 15–25% проти baseline, забезпечуючи час відповіді < 50 мс для переважної більшості запитів (не менше 95%) на CPU та зберігаючи контрольовану кількість сповіщень.

Очікуване практичне значення полягає в економічній доцільності (робота без GPU), масштабованості до ~1000 сервісів, зменшенні операційного навантаження через адаптивні пороги та прозорі сповіщення, а також у простій інтеграції через стандартні інтерфейси. Водночас визнаються обмеження: можливе зміщення даних, дисбаланс класів, сталість у розподілених розгортаннях і компроміс між затримкою та якістю. Як напрями розвитку розглядаються federated learning для multi-tenant-сценаріїв, адаптація до дрейфу та інтеграція з існуючими моніторинг-системами.

ПОСИЛАННЯ

[1] D. Zhan, K. Tan, L. Ye, X. Yu, H. Zhang, and Z. He, "An Adversarial Robust Behavior Sequence Anomaly Detection Approach Based on Critical Behavior Unit Learning," arXiv preprint arXiv:2509.15756, September 2025 https://arxiv.org/abs/2509.15756.

[2] K. Ozaki, Y. Uchino, and T. Imamura, "Ozaki Scheme II: A GEMM-oriented emulation of floating-point matrix multiplication using an integer modular technique," arXiv preprint arXiv:2504.08009, April 2025 https://arxiv.org/abs/2504.08009 .

[3] Y. Jin, K. Okamoto, K. Harada, A. Shibata, and K. Karube, "Similarity-Based Supervised User Session Segmentation Method for Behavior Logs," arXiv preprint arXiv:2508.16106, August 2025 https://www.arxiv.org/abs/2508.16106 .

[4] I. Popova and H. A. A. Gardi, "Credit Card Fraud Detection," arXiv preprint arXiv:2509.15044, September 2025 https://arxiv.org/abs/2509.15044 .

Утилізація теплоти відхідних димових газів у проточному барботажному шарі контактного утилізатора теплоти

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.026

Костюк О.П.
кафедра енергетики
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна

Стецюк І. В.
здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня 2 курсу спеціальності «Теплоенергетика»
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна

Анотація **У статті розглянуто доцільність використання теплоти відхідних димових газів в контактному теплоутилізаторі. Представлено результати експериментального дослідження процесу нагріву води залежно від густини зрошення робочої ділянки, швидкості та температури газів, висоти робочого каналу. Отримано значення граничної температури нагріву води для умов барботажного режиму течії. запропоновано співвідношення для визначення граничної густини зрошення та максимального теплового навантаження контактного утилізатора теплоти.**

Ключові слова*: *проточний барботажний шар, контактний теплоутилізатор, парогазова суміш, гранична температура нагріву, висхідний супутній потік

I. ВСТУП

Проблема енергозбереження та ефективного використання енергоресурсів є найбільш актуальною на сучасному етапі розвитку енергетики України. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є розробка комплексу заходів по використанню вторинних енергоресурсів і, зокрема, корисне використання теплоти відхідних газів технологічного та енергетичного обладнання.

Для утилізації теплової енергії відхідних газів котельних, газотурбінних установок, отримання нагрітої води широко застосовують контактні тепломасообмінні апарати, що дозволяє досягнути глибокого охолодження газів і, таким чином, збільшити коефіцієнт використання теплоти палива. Інтенсифікація робочих процесів в таких апаратах досягається за рахунок безпосереднього контакту газів та рідини, збільшення міжфазної поверхні теплообміну шляхом застосування насадок різного типу. Разом з тим, традиційні конструкції контактних апаратів мають недоліки, до яких можна віднести невисоку швидкість газів в апаратах протитокового типу (1 – 3 м/с), а також достатню громіздкість насадок, які використовуються. Частину з цих недоліків можна усунути при організації взаємодії фаз в барботажному шарі, який утворюється над розподільчою решіткою для газової фази. Такий режим взаємодії середовищ використовується в різних барботажних апаратах, які характеризуються підвищеною інтенсивністю тепло- і масообміну на одиницю об'єму апарату, допускають роботу з забрудненими та помірно в'язкими рідинами, нечуттєві до коливань витрати теплоносіїв. Однак продуктивність таких апаратів з так званим непроточним барботажним шаром також обмежена невисокою швидкістю газової фази внаслідок кризових явищ, що приводять до зруйнування барботажного шару при збільшенні швидкості газу.

Мета роботи – розглянути особливості тепломасообміну у контактному теплоутилізаторі в якому організовано сумісний рух замкнутих газових включень і навколишньої рідини в середині вертикальних труб в умовах проточного барботажного шару, що поєднує переваги високих швидкостей газу з самоорганізацією безперервного перемішування рідини по товщині шару і оновленням поверхні розподілу фаз, а саме дослідити процес нагріву рідини відхідними газами та визначити, яка довжина робочої ділянки буде забезпечувати необхідний процес повної конденсації водяних парів із димових газів на плівці води.

II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Для аналізу та розуміння процесу нагріву води з одночасною конденсацією вологи з газів у висхідній супутній течії газу та рідини в проточному барботажному шарі були проведені дослідження на експериментальній установці, дослідною ділянкою якої була вертикальна трубка, а як теплоносії використовувалися парогазова суміш і вода.

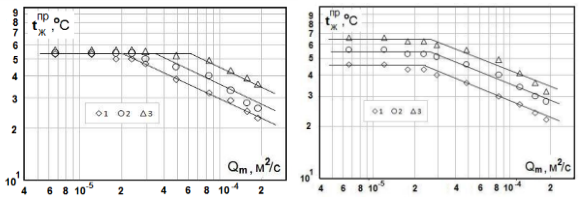
Досліди проводилися на системі повітря – вода та парогазова суміш – вода. Парогазова суміш утворювалась шляхом змішування повітря та водяної пари в камері змішування. Необхідна кількість водяної пари в парогазовій суміші забезпечувалась регулюванням витрат пари і повітря. Організація проточного барботажного шару здійснювалась шляхом незалежного підводу та змішування рідкої та газоподібної фаз, які подавались у барботажну трубку з відповідними

заданими витратами. Підвід рідини у барботажну трубку відбувався по патрубку підводу води, через щілину між нижнім торцем барботажної трубки та діафрагмою, через яку у барботажну трубку підводилось повітря або парогазова суміш.

Температура води визначалась за допомогою термопар. Визначення температур повітря та парогазової суміші проводилось за сухими та мокрими термопарами. Перепад тисків в робочому каналі вимірювався мікроманометром з нахиленою трубкою. Для запобігання втратам теплоти в навколишнє середовище дослідна ділянка експериментальної установки була теплоізольована. Після отримання первинних експериментальних даних перевірялось рівняння теплового балансу.

З досліджень можна зробити висновок, що процеси тепло- та масообміну при конденсації водяної пари з парогазової суміші в умовах висхідної супутньої течії газу та рідини в проточному барботажному шарі найбільш інтенсивно протікають у нижній частині барботажного шару, а протяжність активної зони теплової взємодії фаз складає всього декілька десятків міліметрів. Зі збільшенням густини зрошення нерівномірність температур по перерізу каналу зростає, проте вона дуже швидко згладжується по ходу течії як при малих, так і при великих значеннях густини зрошення. Процес передачі теплоти від парогазового середовища до рідини може бути охарактеризований зміною температури стінки каналу в умовах адіабатності з навколишнім середовищем.

На рис.1 стала температура нагріву води представлена у вигляді явної залежності від густини зрошення при різних значеннях швидкості парогазової суміші на вході в канал (рис.1а) та початкового паровмісту суміші (рис.1б).



а) б)

Рисунок 1. Гранична температура підігріву води при різних значеннях: а) швидкості парогазової суміші при φ = 20%: 1 – $w_{см}$ = 4 м/с; 2 – $w_{см}$=6 м/с; 3 – $w_{см}$ = 12 м/с; б) початковому паровмісту суміші при $w_{см}$ = 6 м/с: 1 – φ = 10%; 2 – 20%; 3 – 30%..

З рисунку видно, що гранична температура нагріву води не залежить від швидкості парогазової суміші та зростає зі збільшенням вихідного паровмісту суміші. При відносно малих значеннях густини зрошення гранична температура нагріву води не залежить ні від густини зрошення Q_m, ні від швидкості парогазової суміші. При досягненні деякого граничного значення, збільшення густини зрошення призводить до падіння температури підігріву води, а збільшення швидкості парогазової суміші до зростання кінцевої температури нагріву води. Було отримано, що при збільшенні початкового паровмісту від 10% до 30% гранична температура підігріву води змінюється від 46°С до 64°С.

Нагрів рідини до граничної температури пов'язаний з умовами масообміну на поверхні розділу фаз при досягненні температури мокрого термометра, при якій починається зворотній процес – процес випаровування рідини. Як видно з рис.2 значення граничної температури підігріву води всього на 3…4°С нижче відповідного значення граничної температури для протиточної схеми за даними І.З.Аронова та перевищує граничну температуру нагріву при висхідному прямотоці газу та плівки рідини приблизно на 3°С.

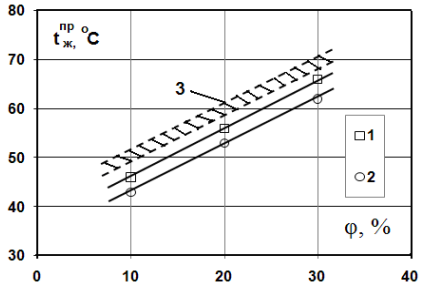


Рисунок 2. Залежність граничної температури контактного нагріву води від початкового паровмісту суміші: 1 – проточний барботажний шар; 2 – висхідний прямоток; 3 – протиток з плівкою рідини для продуктів згорання природного газу за даними І.З. Аронова.

Отримана залежність для граничної температури нагріву води описується формулою

$$t_{ж}^{пр} = 24{,}6\varphi^{0{,}28}. \qquad (1)$$

Рівняння для визначення значення граничної густини зрошення на основі отриманих експериментальних даних має вигляд

$$Q_m^{пр} = 0{,}67 \cdot 10^{-5} \cdot w_{см}^{1{,}1} \cdot \varphi^{0{,}32}. \qquad (2)$$

Рівняння (1–2) справедливі в наступному діапазоні зміни параметрів двофазового потоку: $w_{см}$=4 ÷ 12 м/с, φ=10 ÷ 30 %.

Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що температури сухого та вологого термометрів на виході з робочого каналу після сепаратора повторюють залежності на рис.4.4 та практично рівні між собою. Це свідчить про те, що парогазова суміш на виході з робочого каналу знаходиться на лінії насичення та відповідає відносному паровмісту вологого повітря на діаграмі h–d, рівному 100%. Приймаючи за дослідними даними, що температура парогазової суміші на виході з робочого каналу рівна температурі нагрітої води, з h–d діаграми вологого повітря на лінії, яка відповідає відносному паровмісту вологого повітря 100 %, можна отримати залежність між кінцевим вологовмістом d_2 суміші та відомою граничною температурою води, яка визначається за формулою (1). Дана залежність має вигляд:

$$d_2 = 1{,}78 \cdot 10^{-5} (t_{ж}^{пр})^{2{,}15}. \qquad (3)$$

та відповідає відомій залежності вологовмісту від парціального тиску водяної пари на лінії насичення

$$d = 0{,}622\frac{P_n}{B - P_n}. \quad (4)$$

Визначивши граничну температуру нагріву води в залежності від початкового паровмісту суміші (рівняння (1)), відповідне їй значення граничної густини зрошення при заданих значеннях $w_{см}$ та φ (рівняння (2)), а також параметри (температуру та вологовміст) парогазової суміші на виході з робочої ділянки (рівняння (3)), можна розрахувати максимальну теплову продуктивність робочого елемента (трубки заданого внутрішнього діаметра $d_{вн}$) контактного апарату при умові нагріву води до граничної температури. При цьому маємо:

$$Q_{max} = \pi d_{вн} Q_m^{пр} c_в (t_{ж}^{пр} - t_1) + G_{с.г.}(d_1 - d_2) c_к t_{ж}^{пр}, \quad (5)$$

де $G_в, c_в$ – масова витрата та теплоємність води, яка подається; $t_{під}^{пр}$, t_1 – гранична температура нагріву води та температура води на вході відповідно; $G_к = G_{с.г.}(d_1 - d_2)$ – кількість конденсату; $c_к$ – теплоємність конденсату; $Q_m^{пр}$ – гранична густина зрошення; $G_{с.г.}$ – масова витрата сухого газу; d_1, d_2 – початковий та кінцевий вологовміст газу.

Максимальна витрата газу на робочий елемент контактного апарату можна визначити із співвідношення

$$G_{с.г.}^{max} = \frac{Q_{max} - \left[G_к(r + c_n t_2) + G_{n.1} c_n (t_1 - t_2)\right]}{c_{с.г.}(t_1 - t_2)}. \quad (6)$$

де $G_{с.г.}$ – масова витрата сухого газу; $c_{с.г.1}, c_{с.г.2}$ – теплоємність сухого газу на вході та виході; c_n – теплоємність пари; t_1, t_2 – температура парогазової суміші на вході та виході; $G_{n.1}$, $G_{n.2}$ – витрата пари в суміші на вході та виході; $G_к = G_{с.г.}(d_1 - d_2)$ – кількість конденсату.

III. ВИСНОВКИ

В результаті проведених експериментальних досліджень по тепло- і масообміну при висхідній супутній течії парогазової суміші та рідини в проточному барботажному шарі можна сформулювати наступні висновки: встановлено, що процеси тепло- і масообміну інтенсивно протікають в нижній частині барботажного шару (поблизу шайби), вирівнювання температур газу та рідини відбувається на висоті 60…100 мм; експериментально встановлено значення граничної температури нагріву води та значення граничної густини зрошення при якій рідина нагрівається до граничної температури; отримані граничні характеристики проточного барботажного шару, які можуть бути використані для розрахунку максимальної питомої теплопродуктивності контактного апарата-утилізатора теплоти парогазових сумішей.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Тепловые характеристики проточного барботажного слоя контактных утилизаторов теплоты / М. К. Безродний, П. О. Барабаш, І. О. Назарова, О. П. Костюк. Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. 2009. Вип. 1. С. 16–26.

[2] Костюк О. П. Режими течії двофазових сумішей у проточному барботажному шарі утилізатора теплоти відхідних газів / О. П. Костюк // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2014. – № 12 (1055). – С. 163-170.

[3] Утилізація теплоти відпрацьованих газів котлів у комбінованих тепло- і масообмінних апаратах / В. О. Туз, Я. Є. Трокоз, Н. Л. Лебедь Проблеми загальної енергетики. 2011. Вип. 1. С. 46–50.

[4] М. М. Чепурний, Н. В. Резидент, Т. М. Олексина, і Ю. К. Возіян, «УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ІЗ КОТЛІВ В УТИЛІЗАТОРАХ КОНТАКТНОГО ТИПУ», *НаукПраці ВНТУ*, вип. 4, Січ 2016.

[5] Чепурний М. М. Розрахунки тепломасообмінних апаратів / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 130 с.

Дослідження технічного стану причальної стінки та берегоукріплення

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.027

Сергій Сунічук
Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
s.v.sunichuk@nuwm.edu.ua

Анотація — **У статті розглянуто результати комплексного обстеження технічного стану причальної стінки, що включало контрольно-інспекторські заходи та дослідження будівельних конструкцій. Для роботи використовувалися методи візуального та вимірювального контролю, доповнені неруйнівними інструментальними засобами. Виявлені дефекти були детально зафіксовані з географічною прив'язкою до пікетів, що стало основою для проведення перевірочних розрахунків споруди з урахуванням фактичного фізичного зносу її конструктивних елементів.**

Ключові слова — гідротехнічні споруди, технічний стан, водолазне обстеження, дефекти та пошкодження, безпека споруд

I. ВСТУП

Причальна стінка – це гідротехнічна споруда, що є невід'ємною частиною причалу або набережної. Підтримання безпеки інженерних та гідротехнічних споруд неможливе без оцінки їхнього технічного стану. На основі цієї оцінки вживається низка заходів, які гарантують, що рівень надійності та безпеки споруд відповідає встановленим нормативним і проєктним стандартам [1-5].

Гідротехнічна споруда розташована по вул. Верстовій, 43 в м. Дніпро на лівому березі річки Дніпро. Довжина причального фронту складає 180 м, берегоукріплення загальною довжиною 350 м. Відмітка нормального підпірного рівня (НПР) 51,40 м, рівень навігаційного спрацювання (РНС) 50,70 м. Призначення споруди – забезпечення швартування, стоянки, перевантаження генеральних вантажів та захист території причалу і укріплення берегової лінії від руйнівної дії води.

Мета роботи – обстеження проводиться з метою підвищення безпеки та надійності експлуатації гідротехнічної споруди, її основи і конструктивних елементів. Водолазний огляд є ключовим етапом, що включає ретельну інспекцію підводної частини, зони змінного рівня води, навколишньої акваторії та дна (як біля причалу, так і в зоні руху суден). У ході таких робіт ідентифікуються захаращення, затонулі об'єкти, а також можливі підмиви та промоїни ґрунту.

II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

В конструктивному відношенні причальна стінка являє собою заанкерований больверк довжиною 180,0 м (115,0 м стара частина і 65,0 м – нова) на з/б палях 400х400 мм з плитами забірки (2х3х0,17 м). Стінка заанкерована з/б палями 350х350 мм з уширенням на кінці стволу. За стінкою відсипана кам'яна призма з щебеневим фільтром, яка крім забезпечення грунтонепроникності, виконує роль розвантажувальної призми.

Причальна стінка обладнана відбійними пристроями з 59 автопокришок і 9 швартовими тумбами. Причал може експлуатуватися в нормативному режимі завантаження згідно схеми експлуатаційних навантажень на причал.

Берегоукріплення загальною протяжністю 350,0 м виконано двох типів: з коробчастих габіонів, встановлених в 3-5 рядів протяжністю 250,0 м та з гранітного буту розміром 200-300 мм загальною протяжністю 100,0 м.

Всі закладні деталі та металеві конструкції покриті посиленим антикорозійним складом.

Таблиця 1. Відношення об'єкта до класифікаційних груп

1	за відповідальністю	СС2	гідротехнічна споруда класу СС2-2 [1]
2	за небезпекою технологічних процесів	2	небезпечні виробництва
3	за агресивністю робочого середовища	4	середовище неагресивне

Роботи з підводно-технічного огляду проводились в умовах експлуатації порту.

Виявлені дефекти замірялись, виконувалась фотофіксація особливо пошкоджених ділянок, місцезнаходження фіксувалось з прив'язкою до швартових пристроїв.

Лінія причалу була розбита на відстані в метрах погонних, для точного визначення місця знаходження дефектних ділянок.

Проведений контрольний замір нахилу причальної стінки.

При проведенні огляду причальної стінки водолаз пересувався вздовж лінії причалу, оглядаючи стінку в діапазоні допустимої видимості. Потім проходив цю ділянку на другому рівні глибини. Відстань між проходами водолаза регулювалось у відповідності з видимістю під водою. Місцезнаходження виявлених дефектів визначалось за допомогою лінійки, ехолота с датчиком бокового огляду.

При обстеженні акваторії порту в 20-метровій зоні від лінії причалу водолаз пересувався по ходовому кінцю з розбивкою та орієнтуванням за компасом і водолазному комп'ютеру.

Човен з гідролокаційним обладнанням сканував акваторію на чотирьох віддаленнях від причалу з діапазоном в 5 метрів. Інформація про виявлені дефекти була зафіксована у вигляді фотографій акваторії, точок з прив'язкою до системи навігаційних координат, фотографій проблемних ділянок з прив'язкою до загального плану акваторії та системи GPS координат.

Дефектами прийнято рахувати: наявність сторонніх предметів на дні в районі причальної стінки, щілини в причальній стінці, руйнування причальної стінки, оголення арматури, виноси грунту, глибини менше проектної.

Пошкодження з/б конструкції в зоні періодичного змочування і підводної частини причальної стінки не виявлені. На всій протяжності причальної стінки при огляді дна безпосередньо перед спорудою, виноси грунту не виявлені.

За результатами промірів глибин в акваторії, був складений план. Поверхня дна вздовж причального фронту нерівна. Грунт в акваторії обстеження – пісок, мул, каміння. Дно вздовж причальної стінки і на віддалі від неї до 10 м, покрито дрібними металевими предметами. Всі сторонні предмети за своїми параметрам не є небезпечними для судноплавства.

Результати промірів глибин в 20-и метровій операційній зоні перед причальною стінкою і захватом вліво та вправо від причального фронту: мінімальна глибина річки 4,0 м, максимальна 5,9 м.

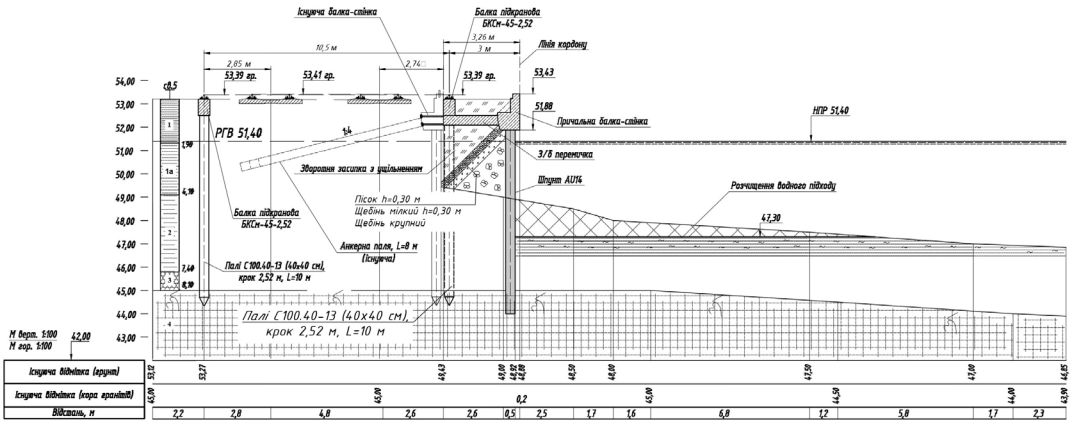


Рисунок 1. Розріз причальної стінки

III. ВИСНОВКИ

Технічний стан підводних конструкцій причалу оцінюється як задовільний, проте потребує проведення планових ремонтних робіт. Виявлені дефекти та пошкодження не впливають на безпеку поточної експлуатації споруди. Обстеження дна вздовж усієї причальної стінки не виявило виносів ґрунту чи небезпечних для судноплавства сторонніх предметів.

Фактичні умови експлуатації (включно з навантаженнями, впливами та характером виробничого середовища) повністю відповідають призначенню споруди.

ЛІТЕРАТУРА

[1] ДБН В.2.4-3:2010 "Гідротехнічні споруди. Основні положення".

[2] ДБН В 1.2414:2008. "Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ".

[3] ДБН А.2.1-1:2014. Інженерні вишукування в будівництві.

[4] ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва.

[5] ДБН В.1.1-7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.

[6] НД 31.3002-2003 «Інструкція з інженерного обстеження та паспортизації гідротехнічних споруд», затверджена Міністерством транспорту України наказом №177 від 11.03.2003 р.

[7] Паспорт технічного стану гідротехнічної споруди : Звіт про технічне обстеження / ТОВ «Водолазно-будівельна компанія» «ТЕХНОДАЙВ» – Дніпро, 2021. – 31 с

Моніторинг вібраційного стану агрегатів гідроелектростанцій

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.028

Юрій Філіпович
Національний університет водного господарства
та природокористування,
м. Рівне, Україна
y.y.filipovych@nuwm.edu.ua

Андрій Боднарчук
Національний університет водного господарства
та природокористування,
м. Рівне, Україна
bodnarchuk_vg23@nuwm.edu.ua

Кароліна Каграманян
Національний університет водного господарства
та природокористування,
м. Рівне, Україна
kahramanian_ak20@nuwm.edu.ua

Анотація — Моніторинг обладнання гідроелектростанції (ГЕС) є важливою частиною її ефективної експлуатації та обслуговування. Цей процес включає в себе систематичне спостереження, збір та аналіз даних про стан елементів ГЕС, щоб вчасно виявляти можливі проблеми, запобігати відмовам обладнання та збільшити робочу продуктивність.

Ключові слова: моніторинг, вібраційні стани, проксіметр, велосіметр, акселерометр, датчик повітряного зазору, волоко-оптичний датчик вимірювання вібрації лобових частин статора

Для моніторингу за станом обладнання на гідроелектростанціях і гідроакумулюючих електростанціях використовуються різноманітні системи. Це можуть бути як окремі системи з окремим датчиками та каналами зв'язку (моніторинг споруд, системи раннього виявлення та оповіщення надзвичайних подій) так і сукупність системи, що інтегрується в єдину систему моніторингу за технологічним процесом (системи термоконтролю, віброконтролю, контролю рівня води в шахті агрегату). Для моніторингу стану технологічного обладнання та управління агрегатами використовується АСК ТП на базі програмно-технічного комплексу Ovation.

Вібрація - це коливання тіла, що супроводжуються зміною його швидкості, положення або форми. Вібрація може виникати внаслідок різних причин, таких як: нерівномірний розподіл навантажень; дефекти деталей; порушення балансування; несправності підшипників [1].

Вібрація може викликати різні несправності обладнання, такі як: руйнування деталей; погіршення точності роботи; зниження коефіцієнта корисної дії.

Для проведення моніторингу вібраційного стану використовуються спеціальні пристрої - вібродіагностичні комплекси. Вібродіагностичні комплекси включають в себе:

- вимірювальні датчики;
- блок обробки даних;
- програмне забезпечення.

Вимірювальні датчики встановлюються на об'єкті контролю. Вони вимірюють вібрацію в різних точках. Дані вимірювань передаються на блок обробки даних.

Блок обробки даних обробляє дані вимірювань і визначає вібраційні характеристики об'єкта контролю. Вібраційні характеристики – це параметри, що характеризують вібрацію. До них відносяться: амплітуда вібрації; частота вібрації; форма вібрації;

Програмне забезпечення, що входить до складу вібродіагностичного комплексу, дозволяє аналізувати вібраційні характеристики. На основі аналізу вібраційних характеристик можна зробити висновок про технічному стані об'єкта контролю.

Моніторинг вібраційного стану агрегатів проводиться в кілька етапів [2].

Перший етап - це встановлення контрольних точок. *Контрольні точки* - це місця на об'єкті контролю, де встановлюються вимірювальні датчики. Вибір контрольних точок залежить від типу об'єкта контролю і його призначення;

Другий етап - це проведення вимірювань. *Вимірювання вібрації* проводяться в статичному і динамічному режимах. Статичні вимірювання проводяться при зупиненому об'єкті контролю. Динамічні вимірювання проводяться при роботі об'єкта контролю.

Третій етап - це аналіз даних вимірювань. *Аналіз даних вимірювань* проводиться за допомогою вібродіагностичного комплексу. На основі аналізу даних вимірювань можна зробити висновок про технічному стані об'єкта контролю.

Основні типи датчиків вимірювання вібрації [2]:

Проксіметри - це датчики, які вимірюють вібропереміщення шляхом безпосереднього контакту з вібруючим об'єктом. Вони бувають кількох типів, в тому числі:

- електромагнітний проксіметр - це датчик, який використовує зміну магнітного поля для вимірювання вібропереміщення.
- оптичний проксіметр - це датчик, який використовує зміну світлового потоку для вимірювання вібропереміщення.
- п'єзоелектричний проксіметр - це датчик, який використовує зміну електричного заряду для вимірювання вібропереміщення.

Велосіметри - це датчики, які вимірюють віброшвидкість шляхом генерації електричного сигналу, пропорційного швидкості вібрації. Вони бувають кількох типів, в тому числі:

- п'єзоелектричний велосіметр - це датчик, який використовує зміну електричного заряду для вимірювання віброшвидкості.
- індуктивний велосіметр - це датчик, який використовує зміну індуктивності для вимірювання віброшвидкості.
- фотоелектричний велосіметр - це датчик, який використовує зміну світлового потоку для вимірювання віброшвидкості.

Акселерометри - це датчики, які вимірюють віброприскорення шляхом генерації електричного сигналу, пропорційного прискоренню вібрації. Вони бувають кількох типів, в тому числі:

- п'єзоелектричний акселерометр - це датчик, який використовує зміну електричного заряду для вимірювання віброприскорення.
- індуктивний акселерометр - це датчик, який використовує зміну індуктивності для вимірювання віброприскорення.
- фотоелектричний акселерометр - це датчик, який використовує зміну світлового потоку для вимірювання віброприскорення.

Для моніторингу вібраційного стану гідроагрегатів Дністровської ГЕС використовуються наступні датчики:

Проксіметри PPT-110



Рис. 1 Проксіметр PPT-110

Датчики типу PPT-110 використовуються для безконтактних вимірювань вібрації валу. Кожна система складається із зонда, подовжувача та драйвера. Системи безконтактних зондів серії PPT розроблені відповідно до стандартів API 670. Вихідна напруга прямо пропорційна виміряній відстані між металевою мішенню та поверхнею датчика. Датчики оснащені броньованими кабелями та роз'ємами.

Акселерометри для вимірювання корпусної вібрації типу AS-073

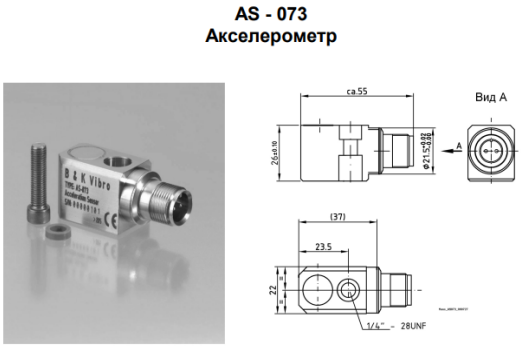


Рис. 2. Акселерометри для вимірювання корпусної вібрації типу AS-073

Акселерометр AS-073 використовується головним чином для вимірювання вібрації механізмів, що обертаються, таких як турбіни, насоси, компресори і т.д.

Використовуються також датчики повітряного зазору для вимірювання повітряного зазору у великорозмірних турбогенераторах, та гідрогенераторах, та електродвигунах; волоко-оптичний датчик вимірювання вібрації лобових частин статора

Для аналізу отриманих даних використовується програмно-технічний комплекс *Compass 6000* компанії «Брюль и Къер Вибро»

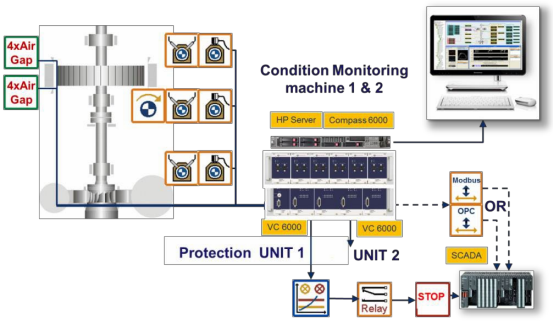


Рис. 3. Програмно-технічний комплекс Compass 6000

Функція системи Compass 6000 - це інтеграція функцій контролю для забезпечення безпеки стану ГД на єдиній платформі. І хоча кінцеві результати можна отримувати і контролювати на єдиній платформі, головні функції системи розподілені між спеціальними модулями безпеки (вимірювальні модулі типу SM).

Функції моніторингу стану реалізовані на сервері моніторингу стану (CMM), який отримує від шасі моніторингу VC6000 всі необроблені сигнали. Спеціальні завдання, які стосуються моніторингу стану, виконуються всередині CMM з метою оптимізації стратегії моніторингу машинного обладнання. Дані від VC6000 та серверів CMM передаються по зв'язку Ethernet до бази даних Compass, де формуються спеціальні тренди, графіки моніторингу стану.

Всі датчики з'єднані кабелями із шафами системи, де змонтовані шасі VC6000. Кожне шасі VC6000 складається з наступних компонентів: шасі (ширина 19”, висота 3 одиниці) та модулі моніторингу безпеки (SM). Модулі резервного живлення для кожної стійки модуля безпеки змонтовані в шасі живлення.

Усі параметри конфігурації залишаються у незалежній пам'яті кожного вимірювального модуля VC6000. Конфігурації зберігаються у внутрішній пам'яті модуля моніторингу безпеки.

Для виконання вимог API 670 функції моніторингу стану повністю відокремлені від функцій безпеки системи. CMM використовує методи частотного аналізу, доступні як у стаціонарному режимі, і при перехідних станах машинного устаткування.

Поділ функцій моніторингу стану та захисту машин забезпечує високу надійність системи загалом. CMM має вбудовану буферну систему, яка тимчасово зберігає дані вимірювань на випадок перевантаження або несправності з'єднання з ЦВМ (CVM).

Інформація ЦВМ (CVM) візуалізується на екрані ЦВМ (CVM).

Доступ до даних можна отримувати і дистанційно – з настільних ПК, з'єднаних через локальну мережу (обсяг поставки за даним проектом не входить). Для отримання графічного інтерфейсу користувача і даних з ЦВМ (CVM) на настільному ПК необхідно встановити ПО 7123.

Результати роботи системи наведені на рисунках (рис. 4 – рис. 5).

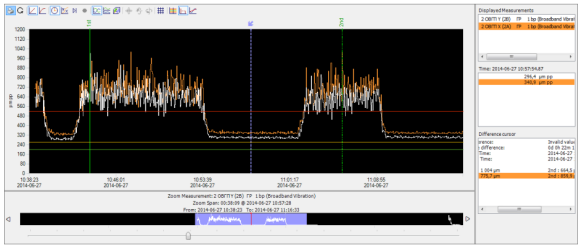


Рис. 4 Відносна вібрація валу генераторного підшипника

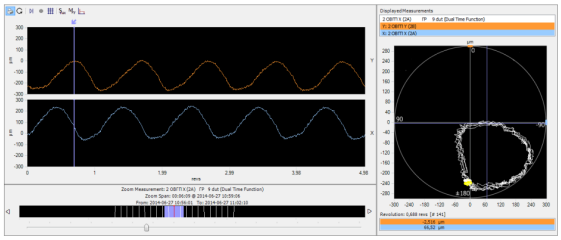


Рис. 5. Орбіта валу генераторного підшипника

Виконана також інтеграція з системою управління. Дані передаються по протоколу modbus та відображаються на видах системи управління.

Моніторинг вібраційного стану агрегатів є ефективним засобом забезпечення їх надійності та безпеки експлуатації. Він дозволяє своєчасно виявити несправності і запобігти аваріям.

Переварги моніторингу вібраційного стану агрегатів: підвищення надійності експлуатації обладнання; зменшення ризику аварій; збільшення терміну служби обладнання; зниження витрат на ремонт і обслуговування.

ВИСНОВОК.

Моніторинг вібраційного стану агрегатів є обов'язковим елементом системи управління виробничим обладнанням.

Моніторинг вібраційного стану агрегатів є одним із важливих засобів забезпечення їх надійності та безпеки експлуатації. Це дозволяє своєчасно виявити несправності, які можуть призвести до аварії або погіршення технічних характеристик обладнання. Моніторинг вібраційного стану агрегатів дозволяє виявляти несправності на ранніх стадіях їх розвитку, коли їх ще можна усунути без великих затрат.

ЛІТЕРАТУРА ТА ДЖЕРЕЛА

[1] Прилад системи моніторингу вібрацій гідроагрегатів // Вінницький НТК. Код доступу: https://studfile.net/preview/9762747/page:15/

[2] Моніторинг, діагностування та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів : монографія. / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацив, В. В. Усов та ін. Вінниця : ВНТУ, 2014. 168 с. Код доступу: https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/114/197/225-1?inline=1

[3] Моніторинг Дністровської ГАЕС / Код доступу: https://geoterrace.lpnu.ua/monitoryng-dnistrovskoyi-gaes

Чисельне моделювання гідравлічних параметрів нижнього б'єфу гідроелектростанції

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.029

Чернобиль О.Є.
Науково-дослідний відділ
ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»
Харків, Україна
oleg.chernobyl@gmail.com

Попруга П.В.
Науково-дослідний відділ
ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»
Харків, Україна
p.v.popruha@nuwm.edu.ua

Поплавський Д.М.
Науково-дослідний відділ
ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»
Харків, Україна
dm.m.poplavskiy@gmail.com

Анотація — **У роботі розглянуто необхідність проведення гідравлічних розрахунків нижнього б'єфу гідроелектростанцій. Показано, що проведення чисельного моделювання, яке базується на інтегруванні рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливих потоків напівявним ітераційним методом, є найбільш раціональним для розрахунку гідравлічних параметрів потоку в нижньому б'єфі гідровузлів. Проведено чисельне моделювання гідравлічного режиму роботи нижнього б'єфу при паралельній роботі ДніпроГЕС-1 та ДніпроГЕС-2, наведено аналіз отриманих результатів.**

Ключові слова **— чисельне моделювання; гідроелектростанція; нижній б'єф; розподіл швидкості; конструктивна стійкість.**

I. ВСТУП

Надійна та безпечна експлуатація гідротехнічних споруд є визначальними чинниками ефективної експлуатації об'єктів гідроенергетики. Сучасне трактування надійності охоплює не лише інженерно-конструктивні характеристики, а й системний аналіз впливів природного, техногенного та аварійного характеру, включаючи тривимірну динаміку потоку, зсуви та взаємодію з довкіллям [1].

Основні аспекти забезпечення безпеки включають конструктивну стійкість споруд при дії граничних навантажень, гідравлічну стабільність (здатність уникати формування зон розмиву, вихрових течій, локальної нестійкості потоку), експлуатаційну надійність (узгоджена робота водоскидів, турбін, дренажних і допоміжних систем) та екологічну безпеку.

Нижній б'єф гідроелектростанцій є складним гідродинамічним середовищем, у якому реалізується цілий спектр процесів, що впливають як на технічний стан гідротехнічних споруд, так і на екологічну рівновагу довкілля [2]. Просторово неоднорідні потоки, турбулентність, коливання рівня води та інтенсивна взаємодія потоку з елементами споруд і русловим середовищем потребують комплексного аналізу для забезпечення безпеки експлуатації.

Ефективна оцінка гідравлічного режиму в нижньому б'єфі має ґрунтуватися на поєднанні методів математичного моделювання (зокрема чисельного) з натурними та лабораторними дослідженнями. Такі дослідження дозволяють виявити зони підвищених напружень і потенційно небезпечні ділянки русла. Це в подальшому дозволить формувати обґрунтовані проєктні рішення з урахуванням динаміки потоку.

II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Сучасні дослідження гідравлічних режимів у нижніх б'єфах гідроелектростанцій все частіше стикаються з необхідністю врахування просторової неоднорідності потоків. Традиційні одновимірні та навіть деякі двовимірні моделі, що базуються на усереднених по перерізу або по глибині характеристиках потоку, часто виявляються недостатньо адекватними для опису складних гідродинамічних явищ, що виникають у нижніх б'єфах. Просторова неоднорідність, яка проявляється у вигляді нерівномірного розподілу швидкостей, тисків, турбулентності та інших гідравлічних параметрів у трьох вимірах, відіграє важливу роль у багатьох процесах, що відбуваються в нижньому б'єфі, і її ігнорування може призводити до значних похибок у прогнозах та оцінках.

Просторова неоднорідність гідравлічних режимів у нижніх б'єфах ГЕС є багатогранним явищем, зумовленим низкою факторів. Основні прояви цієї

неоднорідності проявляються в розподілах швидкостей, турбулентності, тиску тощо.

Неоднорідний розподіл швидкостей по глибині та ширині проявляється при роботі гідротурбін та водоскидних споруд. При цьому формуються струменеві течії, зони з підвищеними та зниженими швидкостями, а також вторинні циркуляційні рухи. Геометрія русла нижнього б'єфа (повороти, звуження, розширення) ще більше ускладнює цей розподіл, призводячи до утворення зон відриву потоку, вихорів та інших тривимірних структур течії.

Неоднорідний розподіл турбулентності особливо притаманний в зонах з високими градієнтами швидкостей, зокрема за лопатями турбін, на водоскидах та в місцях з різкою зміною геометрії русла. Просторовий розподіл характеристик турбулентності (інтенсивність, кінетична енергія, швидкість дисипації) є вкрай нерівномірним і впливає на процеси змішування, транспортування наносів, аерації води та розсіювання забруднюючих речовин.

Неоднорідний розподіл тиску в потоці, що виражається локальними змінами швидкостей та кривизна ліній течії. У зонах прискорення тиск може знижуватися, створюючи ризик кавітації, особливо поблизу гідротехнічних споруд.

У звивистих руслах та за гідротехнічними спорудами виникають поперечні циркуляційні рухи (вторинні течії), які суттєво впливають на розподіл основної течії, транспортування наносів та формування донних деформацій.

Для опису таких явищ на практиці використовуються рівняння Нав'є–Стокса у вигляді системи диференціальних рівнянь (1), що дозволяє моделювати нестаціонарні рухи з урахуванням середньої глибини потоку:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (vh)}{\partial x}=0, \\ \frac{\partial (vh)}{\partial t}+\frac{\partial (v^2h+\frac{1}{2}gh^2)}{\partial x}=-gh\frac{\partial z}{\partial x}-\frac{\tau}{\rho}, \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

де v – середня швидкість течії, h – рівень води, z – висота дна, τ – дотичне напруження, g – прискорення вільного падіння, ρ – густина води, x – координата вздовж русла, t – час.

Пряме чисельне розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса для натурних умов проводиться відносно складно, особливо у випадку турбулентного та сильно неоднорідного потоку в нижньому б'єфі. У зв'язку з цим доцільно використовувати чисельне моделювання. До програмного забезпечення, що дозволяє провести чисельне моделювання роботи нижнього б'єфу гідроелектростанцій, належать HEC-RAS, MIKE, ANSYS Fluent, Flow-3D, CFD++, STAR-CCM+, Autodesk CFD, OpenFOAM [3]. Провівши аналіз вказаного програмного забезпечення, було зроблено висновок, що один з найоптимальніших варіантів розрахунку параметрів потоку, що проходить через гідротехнічні споруд гідровузлів, є використання багатофазного методу розрахунку InterFOAM програмного середовища (бібліотек) OpenFOAM.

InterFoam призначений для моделювання перехідних процесів двох нестисливих, ізотермічних та незмішуваних рідин. Він обробляє ламінарні та турбулентні процеси, враховуючи як ньютонівські, так і неньютонівські рідини. Він використовує підхід об'єму рідини (VoF) для точного визначення межі розділу між середовищами.

InterFOAM використовує об'єднаний в один алгоритми PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) та SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) для зв'язку тиску та імпульсу, забезпечуючи стійкість при обробці перехідних потоків з великими часовими кроками. InterFOAM доповнюється методами недорелаксації для забезпечення стабільності конвергенції [4]. Алгоритм проведення розрахунку за допомогою InterFOAM описано в [5].

Багатофазний метод InterFOAM був використаний для проведення перевірочного розрахунку роботи нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС при умові паралельної роботи ГЕС-1 та ГЕС-2 з проєктними потужностями. Вказаний розрахунок був виконаний для аналізу гідравлічних навантажень на відкоси відвідного русла, що приводять до поступового їх руйнування.

До складу основних споруд Дніпровської ГЕС входять: будівлі ГЕС-1 та ГЕС-2, водозливна бетонна гребля, глухі право- та лівобережні греблі, шпора, щитова стінка, аванкамера з бетонним укосом, бетонний укіс відвідного русла та бетонне кріплення берега русла.

Для проведення розрахунку була створена спрощена 3D модель гідровузла площею в плані близько 2,5 км^2 (рис. 1). Вихідними даними слугували проєктні величини довоєнного періоду. Рельєф дна нижнього б'єфу був побудований виходячи з [6].



Рисунок 1. Розрахункова схема чисельного моделювання нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС

При проведенні чисельного моделювання не менш важливо прийняти оптимальні граничні умови. Для InterFOAM граничні умови задаються для трьох основних величин: тиску, швидкості та фазової функції. Граничними умовами швидкості на вході передбачають задання певної об'ємної витрати з урахуванням змін площі перерізу, тобто забезпечення постійної масової витрати. Так для ГЕС-1 проєктна витрата складала 2025 м^3/с, відповідно ГЕС-2 - 3080 м^3/с. Величини тиску на вході задавалася виходячи з величин розрахункового напору (для ГЕС-1 він рівний 36,3 м, для ГЕС-2 – 34,3 м). Фазової функції на вході рівна одиниці, на виході найбільш раціонально використовувати граничну умову «нульового градієнту, що прирівнює значення шуканої величини на границі до її значенні в найближчому до граничної ділянки центрі комірки. Швидкість на виході розраховується автоматично при умові нульового градієнту, коли потік залишає розрахункову область. Величина тиску на виході розраховує автоматично градієнт тиску таким чином, щоб потік на границі відповідав заданому граничною умовою швидкості.

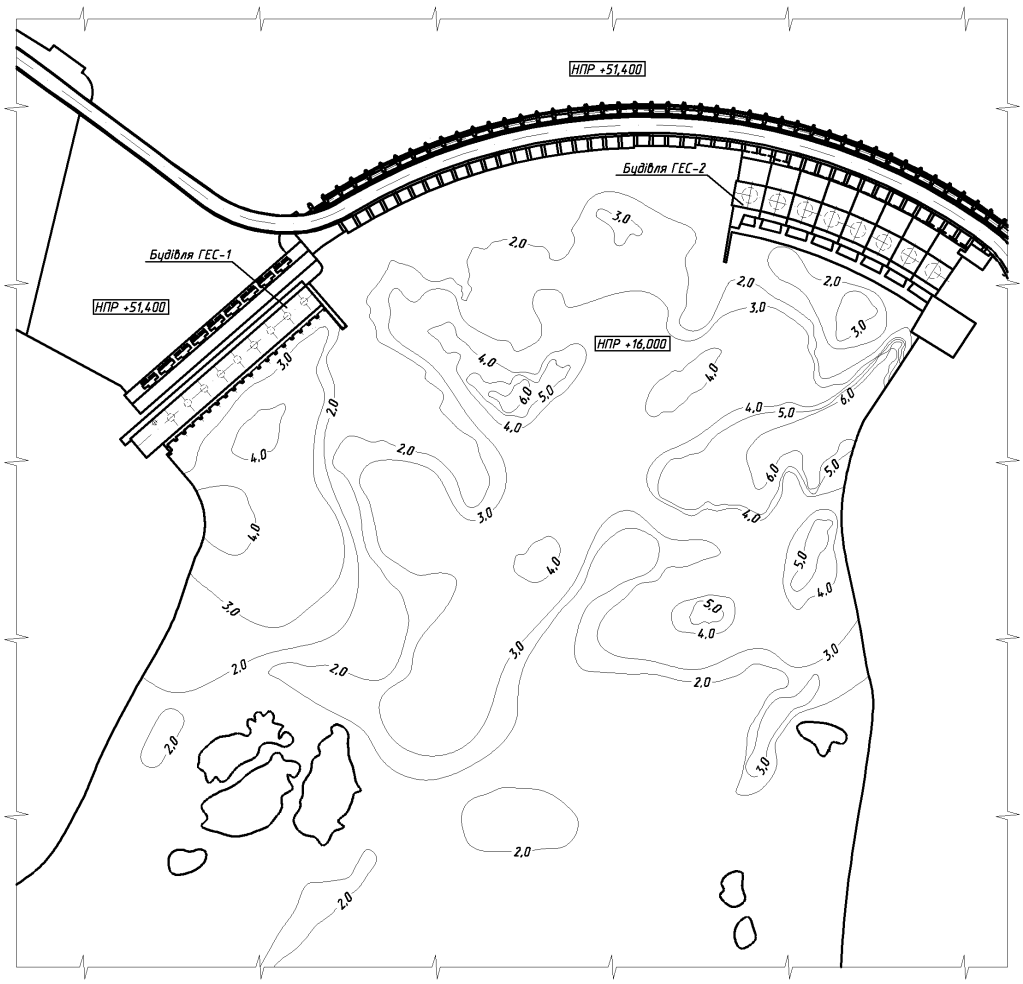


Рисунок 2. Усереднений в часі розподіл швидкості в нижнього б’єфу Дніпровської ГЕС (план-розріз на відмітці +13,000 м)

Згідно описаними вище вихідними даними та граничними умовами було проведено чисельне моделювання роботи нижнього б’єфу Дніпровської ГЕС. Тривалість симуляції визначалася умовою стабілізації потоку та відносної остійності розподілу швидкості в часі. Результати моделювання були проаналізовані та перенесені на характерні план-розрізи: відмітки +16,000 м, +15,000 м, +13,000 м, +10,000 м, +5,000 м та +3,000 м. На рис. 2 наведено план-розріз на відмітці +13,000 м усередненого в часі розподілу швидкості в нижньому б’єфі Дніпровської ГЕС. Для зручності на план-розріз (рис. 2) не наносилися швидкості потоку величина яких не перевищувала 2 м/с.

Аналізуючи отримані дані було встановлено, що найбільші гідравлічні навантаження на відкоси відвідного русла при паралельній роботі ГЕС-1 та ГЕС-2 розташовуються практично біля виходу потоку з будівель ГЕС (рис. 2). Дане твердження в повній мірі відповідає даним, що були отримані під час проведення регулярних візуальних обстежень.

Додатково було проведено аналіз донних швидкостей потоку. Цей аналіз дозволяє встановити зони дна нижнього б’єфу, що найбільше схильні до розмиву через відносну велику донну швидкість. Результати аналізу схематично наведені на рис. 1, що в цілому відповідає картині руху потоку в нижньому б’єфі Дніпровської ГЕС.

Розподіл швидкості по глибині потоку має класичний характер. При аналізі результатів аномальних відхилень не зафіксовано, що свідчить про вірність наведеного розрахунку.

ВИСНОВКИ

Особливістю нижнього б'єфа гідровузлів є складна, просторово неоднорідна та динамічно нестійка структура потоку, яка формується внаслідок дії водозливних витоків, роботи турбін, руслової геометрії, локального рельєфу дна та експлуатаційних режимів гідротехнічних споруд. Урахування тривимірного характеру течії та просторово-часових варіацій є критично важливим при моделюванні гідравлічних процесів, зокрема для проєктування енергогасильних систем, оцінювання руслових деформацій та прогнозування зон акумуляції наносів.

Використання диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса в чисельному моделюванні дозволяє проводити розрахунки гідравлічних режимів верхнього та нижнього б'єфів гідроелектричних станцій.

В роботі представлений перевірочний розрахунок роботи нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС при умові паралельної роботи ГЕС-1 та ГЕС-2 з проєктними потужностями, при цьому був використаний багатофазний метод InterFOAM програмного середовища OpenFOAM.

Згідно проведених розрахунків нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС було встановлено зони найбільших гідравлічних навантажень на відкоси відвідного русла та донних швидкостей. Отримані дані добре узгоджуються з результатами візуальних та підводно-технічного обстежень.

[1] Іваненко І.П. Безпека експлуатації гідротехнічних споруд/ І.П. Іваненко, В.С. Петров; Видавництво НАН України, 2018. – 256 с.

[2] R.J. Houghtalen, A.O. Akan, N.H.C. Hwang, Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems. Fourth Edition. London: Pearson Education Ltd., 2010, 472 ps.

[3] Z. Li Comparison of wave modeling methods in CFD solvers for ocean engineering applications / Li Z., Deng G., Queutey P., Bouscasse B., Ducrozet G., Gentaz L., Le Touzé D., Ferrant P.// Ocean Engineering. – 2019. – Vol. 188. – 106237.

[4] Попруга П.В. Чисельне моделювання паводкового режиму роботи нижнього б'єфу низьконапірних гідроелектростанцій/ П.В. Попруга, Д.М. Поплавський// «Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія». Харків, №1, 2025.

[5] OpenFOAM: User Guide v2112. InterFoam [Електронний ресурс] // OpenCFD Ltd. – Режим доступу: https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-multiphase-interFoam.html (дата звернення: 01.08.2025). – Назва з екрана.

[6] Технічний звіт на виконання підводно-технічного (батиметричного) обстеження підводної частини гідротехнічних споруд верхнього та нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС. Київ: ТОВ «ДАЙВТЕХНОБУД 2», 2013, 36 с.

СЕКЦІЯ 3

ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

MCIT Modeling, control & information technologies

Software module for capturing and tracking moving targets

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.030

O. Hladka
Department of Computer Technology and Economic Cybernetics
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
o.m.hladka@nuwm.edu.ua

I. Karpovich
Department of Computer Technology and Economic Cybernetics
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
i.m.karpovich@nuwm.edu.ua

A. Tymrakevych
Student at the Institute of Cybernetics, Information Technologies and Engineering
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
tymrakevych_ak22@nuwm.edu.ua

Abstract—**Software for drones has been created that allows tracking objects in real time. A software module has been developed that provides automatic capture and tracking of moving targets. The developed software uses computer vision algorithms and machine learning technologies. The object tracking mechanism has been integrated using CSRT or KCF trackers. An algorithm for automatic image scaling taking into account target movement has been implemented. Video stream processing has been optimized to ensure stable tracking of object movement in real time. Interactive control of the tracking process using control keys has been implemented.**

Keywords—software; drone; computer vision algorithms; machine learning

I. Introduction

In the modern world, drones have become an integral part of many areas of activity - from military operations and reconnaissance to industrial monitoring, agriculture and search and rescue missions. Due to their mobility, autonomy and ability to work in difficult conditions, unmanned aerial vehicles have significantly expanded the capabilities of control, surveillance and performing specialized tasks. In order to increase the variety of tasks that drones can perform, special software modules with various functions are being developed for them. Modern computer vision methods integrated into unmanned systems allow to significantly increase the efficiency of their work, automate image analysis processes and minimize the human factor in the control process. The use of video processing algorithms and machine learning allows not only to identify targets, but also to predict their movement, adapt tracking strategies and respond to changing environmental conditions.

The work was carried out on behalf of the company "AMLAB" LLC during the internship. This company plays an important role in strengthening the country's defense capabilities, as it produces unmanned aerial vehicles and electronic warfare systems, which are actively used for military needs. In addition, the company cooperates with charitable foundations and military units, partly working on a volunteer basis.

In this work, software for drones has been developed that allows for real-time object tracking. The developed software uses computer vision algorithms and machine learning technologies.

II. Analysis of the Functionality of the Software Module

The main goal of this work is to develop a software module for drones that provides automatic capture and tracking of moving targets.

The following tasks were completed:

- Using OpenCV to implement computer vision algorithms.
- Integration of the object tracking mechanism using CSRT or KCF trackers.
- Development of an algorithm for automatic image scaling taking into account target movement.
- Optimization of video stream processing to ensure stable real-time tracking.
- Interactive control of the tracking process using control keys.

The software module is developed in Python using the OpenCV library [1]. The program uses computer vision algorithms [2] to determine the position of an object in the frame and scale it for improved display. The code initializes the webcam, processes video frames, determines a region of interest in the center of

the frame, and also applies tracking algorithms to track moving objects.

CSRT (Channel and Spatial Reliability Tracker) and KCF (Kernelized Correlation Filter) are two popular object tracking algorithms in computer vision, used for video stream analysis, for example in drone control systems. CSRT has high accuracy and support for scaling, while KCF has fast real-time tracking [3].

Tracker initialization. This part of the code checks if the OpenCV library supports CSRT or KCF trackers. If CSRT is available, it is used by default. If CSRT is not available, KCF is used. If neither is supported, the program terminates with an appropriate error message.

Initializing variables:

- tracking it is indicates whether tracking is active.
- tracker is tracker object.
- frame_center_rect_size is size of the central square for selecting the area.
- zoom_factor is area enlargement factor.
- enlarged_region is variable for storing the enlarged image.
- cap = cv2.VideoCapture(0) it is opens the video stream from the camera.

Function to draw a central rectangle. This function draws a central square (rectangle) that is used to define the tracking area.

The main video stream processing loop. This loop receives frames from the camera, checks their correctness, and continues processing.

Object tracking. If tracking is active, the program updates the object's position, draws a blue rectangle, and crops the area for magnification.

Key management. This part of the program handles key presses:

- `q` is exits the program.
- `Space` it is turns tracking on/off.

To get started, run the program from the command line using the command: *python tracker.py*. After starting, a window with a video stream from the camera will open. The program checks whether the current version of OpenCV supports CSRT or KCF trackers. If both trackers are not available, the program terminates with an error message. The `cv2.VideoCapture(0)` object is used to open the stream from the first connected camera.

The program reads the first frame to determine the video dimensions. A fixed frame (50x50 pixels) is displayed in the center of the screen, which defines the initial tracking area.

To start or stop tracking an object within the central area, place the object to track in this area and press Spacebar.

If tracking is active, the program initializes the tracker and constantly updates the position of the object. If the object is successfully tracked, a blue rectangle is drawn around it. At the same time, the selected area is magnified twice (using `cv2.resize`) and displayed at the top of the window.

If the tracker cannot find the object, a red message "Tracking lost!" appears on the screen. The program continues to display the last recorded area, even if tracking is stopped or lost.

Application possibilities [4-5]:

- Video surveillance: Real-time tracking of moving objects for territory protection.
- Behavior analysis: Monitoring the activity and behavior of objects in the frame for research or automated systems.
- Research goals: Studying computer vision methods and tracking algorithms, setting tracker parameters for different types of objects.

Conclusions

Automation of the process of target detection and tracking is one of the important tasks in the field of modern technologies of unmanned aerial vehicles. The use of such algorithms allows to reduce the influence of the human factor, increase the accuracy and efficiency of task performance, as well as ensure the autonomous operation of drones in difficult conditions. The developed software can be used for military purposes for reconnaissance, tracking of suspicious objects or for civilian applications, such as crowd control, transport surveillance or research of natural phenomena.

References

[1] "Solidworks," https://allsoft.ua/p686356387-solidworks-standard-term.html?srsltid=AfmBOoqpWniXYS4b4cjwcVN4_Oh44AYN5Co0o5SfN8I1O-2zHdwmFWOb

[2] "Fusion 360," https://medium.com/@artemkysliakov/fusion-360-з-чого-почати-f0bc98d84f21

[3] "What is Orca Slicer?," https://orcaslicer.net

[4] J. P. Smith, "Entity Framework Core in Action," Manning, 2018.

[5] M. J. Price, "Apps and Services with .NET 7: Build practical projects with Blazor, .NET MAUI, gRPC, GraphQL, and other enterprise technologies," Packt Publishing, 2022.

MCIT Modeling, control & information technologies

Mathematical Approximation and Physical-Technical Aspects of the Operation of an Atmospheric Acousto-Optic Locator with an Electronic Scanner in Military Specialized Systems

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.031

Ashraf Huseynov
Doctor of Philosophy in National Security and Military Sciences, Associate Professor
huseynovashraf@yandex.ru

Aynura Abdullayeva
Military Scientific Research Institute, National Defense University, Azerbaijan, Baku
aynure-huseynova-2025@mail.ru

Abstract— **This study presents a comprehensive investigation of the operation of an atmospheric acousto-optic locator with an electronic scanner for military applications. The research includes a detailed analysis using mathematical and physical methods such as the finite difference method, Fourier decomposition, and variational methods to develop analytical models describing the dynamics of acousto-optic processes and the functioning of the scanning system. A physico-technical analysis, based on the principles of acoustics and optics, evaluates the system's stability and sensitivity under varying atmospheric conditions and electromagnetic interference.**

Experimental data obtained under simulated extreme field conditions confirm the high accuracy of mathematical approximations and a significant improvement in object detection parameters. The results indicate the potential for integrating the developed locator into modern military reconnaissance and surveillance systems, enhancing the speed and accuracy of target detection in complex operational environments.

I. Introduction

In modern military conflicts and asymmetric warfare scenarios, the development of high-precision detection systems is of critical importance. The application of acousto-optic principles, which enable the detection of objects at long distances even under limited visibility and strong electronic countermeasures, combined with electronic scanning methods, ensures rapid decision-making and the protection of strategically important assets. The practical significance of such systems has been confirmed by military research [1], while mathematical modeling using finite difference methods, Fourier decomposition, and variational approaches allows for a detailed description of acoustic and optical wave propagation dynamics [2]. The integration of these approaches opens new possibilities for the creation of early detection, reconnaissance, and surveillance systems [3].

The objective of this study is to develop a comprehensive mathematical model and conduct a physico-technical analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optic locator with an electronic scanner for military applications, aiming to improve its accuracy, response time, and resilience to external influences. To achieve this goal, the study involves formulating a mathematical model of the system; analyzing the impact of environmental parameters on wave propagation and the characteristics of the phased-array electronic scanner; optimizing system parameters by developing efficiency criteria and identifying optimal frequency ranges and scanning angles; designing signal processing algorithms incorporating filtering, noise reduction, and machine learning techniques; and performing experimental validation of the results.

1. Theoretical Foundations of an Atmospheric Acousto-Optic Locator with an Electronic Scanner

1.1. Physical Principles of Acousto-Optic Interaction

The acousto-optic effect is based on the diffraction of optical waves on a periodic grating formed by an acoustic wave within a medium [4]. This phenomenon is described by Bragg's equation:

$$\lambda=2n\upsilon/f \qquad (1)$$

where λ is the wavelength of the diffracted light, n is the refractive index of the medium, υ is the speed of sound in the medium, and f is the frequency of the acoustic wave.

Light scattering in an acousto-optic crystal occurs due to the modulation of the refractive index, which is described by the equation:

$$n(x,T)=n_0+\Delta n \cos⟦(2\pi ft-k_s x)⟧, \qquad (2)$$

where n0 is the initial refractive index, Δn is the amplitude of the refractive index modulation, and ks is the wavenumber of the acoustic wave.

The first-order diffraction efficiency M1 can be expressed in terms of the acousto-optic interaction parameter as:

$$M_1=\pi d/\lambda\cdot(\langle\!\langle pn\rangle\!\rangle_0\hat{}3)/\langle\!\langle p\upsilon\rangle\!\rangle\hat{}3\ P, \quad (3)$$

where d is the thickness of the acousto-optic cell, p is the acousto-optic coefficient, ρ is the density of the medium, and P is the ultrasonic power.

1.2. Propagation of Acoustic and Optical Waves in the Atmosphere

Acoustic Waves in the Atmosphere

The propagation of sound waves in the atmosphere is described by the wave equation [5.18]:

$$(\partial\hat{}2\ p)/(\partial t\hat{}2\ )=c\hat{}2\ \nabla\hat{}2\ p, \quad (4)$$

where p is the acoustic pressure, and c is the speed of sound in the atmosphere. The speed of sound in the atmosphere depends on temperature and is given by the equation:

$$c=\sqrt{}\ \gamma\ RT, \quad (5)$$

where γ is the adiabatic index of air, R is the gas constant, and T is the absolute temperature.

Optical waves in the atmosphere

The propagation of optical waves in the atmosphere is influenced by turbulence, which alters the refractive index n. The interaction of light with the inhomogeneous atmosphere is described by the paraxial wave equation [6,19]:

$$\partial E/\partial z=i/2k\ \nabla_T\hat{}2\ E+ikn(x,y,z)E, \quad (6)$$

where E is the electric field, $k=2\pi/\lambda$ is the wave number, and $\nabla_T\hat{}2$ is the transverse Laplacian operator.

The fluctuations of the refractive index due to turbulence are approximated by the Kolmogorov model:

$$\Delta n\approx C_n\hat{}2\ L\hat{}(2/3) \quad (7)$$

where $\langle\!\langle\ \nabla C\ \rangle\!\rangle_n\hat{}2$ is the turbulence structure coefficient and L is the characteristic turbulence scale.

1.3. Electronic Scanning

Electronic scanning is implemented using a phased antenna array, where the phase shift between the array elements allows for the beam direction to be changed without mechanical movement [7,20]. The scanning angle is defined through the phase gradient:

$$\theta=\arcsin(\lambda/2\pi d\ \Delta\varphi), \quad (8)$$

where d is the distance between the radiating elements, and Δϕ is the phase shift between adjacent elements. The optimal phased array scheme can be represented by a system of equations:

$$E(\theta)=\Sigma_(n=1)\hat{}N\ \langle\!\langle A_n\ e\hat{}(i(kd_n\ \sin\theta+\varphi_n\ ),\rangle\!\rangle \quad (9)$$

where An_n is the amplitude of the signal in the nn-th element, and ϕn is the phase shift.

Thus, the acousto-optic locator with electronic scanning uses a combination of acousto-optic principles for controlling the light flow and a phased array for dynamically changing the scanning direction. These physical and mathematical models enable the analysis and optimization of the system parameters for military applications.

1.4. Military Requirements and Specifications of the Atmospheric Acousto-Optic Locator with Electronic Scanning

The atmospheric acousto-optic locator with electronic scanning is designed for military reconnaissance, surveillance, and early warning systems, providing high accuracy in object coordinate determination, rapid data processing, stable operation in challenging weather conditions, and protection against interference and countermeasures from adversaries [8]. The system is integrated into modern military platforms, such as UAVs, ground complexes, and naval air defense systems, and must operate in extreme climatic conditions (from −50°C to +60°C), exhibit immunity to electronic warfare (EW), and demonstrate durability with the ability for autonomous diagnostics, self-correction, rapid replacement, and modular repair [9,21]. Additionally, the locator must precisely determine the coordinates of aerial, ground, and surface objects in real-time [10].

Key system parameters include angular resolution:

$$\Delta\theta=\lambda/D \quad (10)$$

(where Δθ is the minimum angular size of the object, λ is the wavelength of the laser, D is the aperture diameter), which for military systems should be no less than 0.01°, and the accuracy of distance measurements:

$$\sigma_R=\lambda c/2B \quad (11)$$

where σR is the distance measurement error, c is the speed of light, and B is the signal bandwidth, requiring an accuracy of less than 1 m at distances up to 50 km. The system should detect objects with an effective radar cross-section (RCS) of 0.01 m² and function under

active countermeasures, with a response time of less than 10 ms and a refresh rate of at least 100 Hz [11,22]. The use of adaptive algorithms (Kalman filter, artificial neural networks) ensures automatic target tracking and data transmission to centralized combat systems. Furthermore, current requirements specify the minimization of weight (up to 20 kg) and power consumption (up to 200 W) for installation on mobile platforms [12].

2. Mathematical Approximation

2.1. Problem Formulation

This study aims to develop a mathematical model describing the acousto-optic processes in the system, as well as the dynamics of the electronic scanning device. The main equations include:

- Acousto-optic diffraction, described by Bragg's equation (1).

- Modulation of the refractive index, described by equation (2).

- Wave equation for the acoustic wave, described by equation (4).

- Paraxial equation for the optical field, described by equation (6).

- Electronic scanning using a phased array can be represented by the system of equations (9).

2.2. Applied Approximation Methods

To simplify and solve the above equations, the following mathematical approximation methods are used:

1. Finite Difference Method (FDM):

For the numerical solution of wave equations, discretization in time and space is performed [13,23]. For example, the wave equation for acoustic pressure can be approximated using the following relation:

$$(p_i^{n+1}-2p_i^n+p_i^{n-1})/ 〖 Δt 〗 ^2 =c^2 (p_i^{n+1}-2p_i^n+p_i^{n-1})/ 〖 Δx 〗 ^2 , \quad (12)$$

where pin is the pressure value at node i at time nΔt, Δt is the time step, and Δx is the spatial step.

2. Fourier Series Expansion:

For the spectral analysis of the optical field, the function E(x)E(x) is expanded into a Fourier series [14]:

$$E(x)=Σ_{m=-∞}^{∞} 〖E^_m e^{i 2πm/L x}, 〗 \quad (13)$$

where E^_m are the Fourier coefficients, and L is the period of expansion. This method allows isolating individual harmonic components and simplifying convolution operations.

3. Variational Calculus Methods [15,24]:

Variational methods are used to optimize system parameters by minimizing a functional that represents the error between experimental data and model predictions. For example, the error functional can be defined as:

$$J[n(x,t)]= ∫ |E_exp (x,z)-E_model (x,z;n(x,t)|^2 \, dxdz, \quad (14)$$

where Eexp is the experimentally measured optical field, and Emodel is the modeled optical field, which depends on the refractive index distribution n(x,t). Minimizing J with respect to n(x,t) allows determining the optimal modulation profile of the refractive index.

4. Analytical Solutions and Error Estimation

Under certain approximations (e.g., when $Δn \ll n0$), it is possible to obtain analytical solutions [16,25]. For example, for small perturbations, the diffraction angle dependence can be expanded in a Taylor series:

$$θ≈ θ_0+Δθ, \quad θ≈1/n_0 \; Δn/(tanθ_0), \quad (15)$$

where θ0 is the base diffraction angle, and Δθ is the correction due to the modulation of the refractive index.

The error estimation is carried out by analyzing the convergence of the finite difference scheme. The local approximation error ϵ has the order:

$$∈~O(Δt^2+O(Δx^2) \quad (16)$$

Thus, reducing the discretization steps Δt and Δx leads to a decrease in the approximation error.

The applicability of analytical and numerical solutions is determined by the range of parameters within which the initial assumptions (e.g., small disturbances and stationarity of the medium) hold. The developed models enable the optimization of the design parameters of the locator, taking into account

the strict requirements of military applications. This comprehensive mathematical framework, which includes finite difference methods, Fourier expansion, and variational methods, provides a reliable approach for modeling acousto-optic interactions and the dynamics of electronic scanning devices in military applications.

3. Physical and Technical Analysis of the Device's Operation

3.1. Structural Features of the Locator

The atmospheric acousto-optic locator with an electronic scanner is an integrated system consisting of an optical module, an acoustic transducer, and an electronic scanning control system.

Optical Scheme:

The core of the optical module is a laser source with a high level of coherence, ensuring stable emission with a narrow spectral range. The laser beam passes through an acousto-optic crystal, where the refractive index is modulated by ultrasonic vibrations, creating a periodic structure for light diffraction. The optical elements used (lenses, mirrors, filters) are optimized to minimize aberrations and energy losses, which ensures high accuracy in beam formation.

Acousto-Optic Diffraction Equation:

The acousto-optic diffraction process can be described by the diffraction equation, which considers the changes in the refractive index caused by the acoustic wave. This equation provides a means to calculate the diffraction efficiency of the system, which is crucial for determining the direction and intensity of the beam after passing through the acousto-optic crystal. The interaction length, the frequency of the acoustic wave, and the intensity of the optical beam are critical parameters for optimizing performance.

This design of the optical scheme ensures the precise control of the light beam, enabling the acousto-optic locator to operate effectively under varying atmospheric conditions and to achieve the required performance for military applications:

$$\theta_d=\lambda f/V \ . \qquad (17)$$

Where: θd is the diffraction angle, λ is the wavelength of the laser radiation, f is the frequency of the ultrasonic signal, V is the speed of sound in the medium.

The acoustic component: The acoustic system includes ultrasonic transducers that generate acoustic waves with a specified frequency and power. These transducers are placed in close proximity to the acousto-optic crystal to ensure efficient energy transfer and the creation of the required acousto-optic grating. The materials used in the acoustic module are selected based on high mechanical strength characteristics and low sensitivity to temperature fluctuations.

Electronic scanner: The electronic scanning system is based on the principle of a phased array antenna. By controlling the phase shifts of individual array elements, a directed beam is formed, enabling dynamic scanning without mechanical movement. Modern digital signal processing algorithms allow for real-time adjustment of phase shifts, significantly enhancing the accuracy and speed of the scanning system. Figure 1 shows the structural diagram of the investigated atmospheric acousto-optic locator with an electronic scanner. [26,27.28].

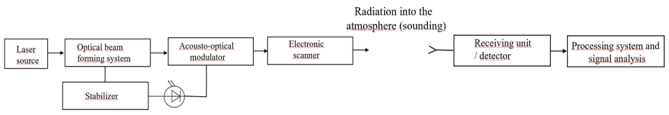


Figure 1. Structural diagram of the atmospheric acousto-optic locator with an electronic scanner.

Brief description of the components:

Laser source: generates a coherent light beam.

Beam forming optical system: shapes and directs the beam for further processing.

Acousto-optic modulator: uses acoustic waves to modulate the optical signal (control of phase, amplitude, or beam direction).

Electronic scanner: enables electronic scanning of the beam, allowing rapid changes in the beam's direction without mechanical movement.

Emission into the atmosphere (probing): the modified beam is emitted into the atmosphere for the detection and analysis of reflected signals.

Receiver block / Detector: receives the reflected signal from objects in the atmosphere.

Signal processing and analysis system: analyzes the collected data to determine the parameters of the detected object or atmospheric phenomenon.

3.2. Modeling of System Dynamics

Modeling the dynamics of the locator's operation includes analyzing transient processes, assessing system stability, and investigating its sensitivity to external influences using physical laws and mathematical analysis methods.

Transient Processes: To describe the temporal dynamics of acousto-optic and scanning processes, differential equations are used. For example, transient processes in the acousto-optic module are described by the wave equation [17,28]:

$$(\partial^2 p(x,t))/(\partial t^2)=c^2 \nabla^2 p(x,t) , \qquad (18)$$

where p(x,t) is the acoustic pressure, and c is the speed of sound in the material. To calculate the temporal evolution of the electric field in the optical channel, the paraxial wave propagation equation is used:

$$\partial E(x,y,z)/\partial z=i/2k \nabla_T^2 E(x,y,z)+ikn(x,y,z)E(x,y,z). \quad (19)$$

Stability Analysis: The stability of the system is investigated through spectral analysis of linear perturbations. For example, in the case of a phased array, eigenvalue analysis of the transition matrix is applied to determine the range of parameters within which the system remains stable in the presence of phase errors or time delays in control.

Sensitivity to External Influences: To assess the impact of external factors (such as atmospheric turbulence, temperature fluctuations, and electromagnetic interference), models are developed that account for parameter fluctuations in the environment. Within the framework of the Kolmogorov model, variations in the refractive index are described by the following relation:

$$\Delta n(x,y,z) \approx C_n\hat{}2\ L\hat{}(2/3) \qquad (20)$$

where Cn2 is the structure coefficient of turbulence, and L is the characteristic scale of instability. Such models enable numerical analysis and evaluation of the impact of external disturbances on the quality of beam formation and scanning.

3.3. Engineering Solutions for Military Applications

When developing the locator for military applications, particular attention is given to reliability, protection from interference, and adaptability to extreme conditions. Design solutions include the use of high-strength materials, a modular architecture for quick replacement of faulty components, self-diagnosis, and self-correction systems, ensuring device fault tolerance. To protect against electromagnetic interference and electronic warfare, shielding materials, filters, and adaptive filtering algorithms are used to minimize parasitic reflections and false signals.

Engineering solutions also involve adapting the system to extreme temperature conditions (from –50°C to +60°C) through active cooling and overheating protection, as well as reinforcement of optical and acoustic components. Additional vibration isolation and shock-resistant mounts ensure stable operation of the locator under dynamic loads, making it an indispensable tool in modern reconnaissance and surveillance systems.

4. Experimental Verification and Numerical Models

4.1. Description of the Experimental Setup

An experimental setup was developed to verify the performance of the atmospheric acousto-optic locator, enabling the assessment of its optical and acoustic characteristics in real conditions. The setup includes a stabilized laser with a narrow spectral line, an acousto-optic module with a crystal and ultrasonic transducers, as well as an electronic scanning system based on a phased antenna array.

The parameters are measured using photodetectors, spectral analyzers, and digital oscilloscopes. The experiments are conducted in laboratory conditions, simulating extreme temperatures, electromagnetic interference, and atmospheric turbulence, which allows for an objective evaluation of the system's operability.

4.2. Comparison of Experimental Data with Theoretical Models

Below are examples of schematic graphs presented in an "open form."

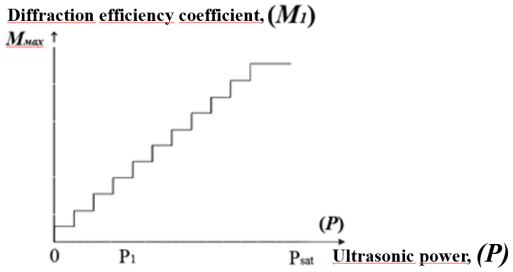
These graphs illustrate the key dependencies described in the experimental validation and numerical models.

To assess the accuracy of the developed theoretical models, a detailed comparison of experimentally obtained data with analytical and numerical predictions was conducted:

Diffraction Characteristics: The theoretical model, based on the Bragg condition (1) and the first-order diffraction efficiency expression (3), predicts the dependence of diffraction order intensity on ultrasonic power, crystal thickness, and other parameters. Experimental measurements of diffraction beam intensity showed agreement with theoretical values, with a relative error of less than 5%.

A graph of the diffraction efficiency coefficient versus ultrasonic power is constructed using formula (3), where the x-axis represents the ultrasonic power P (in watts), and the y-axis represents the diffraction efficiency M1 (Graph 1).

The graph exhibits a linear relationship, confirming that an increase in ultrasonic power leads to a rise in diffraction beam intensity.



Graph 1. Dependence of diffraction efficiency M1 on ultrasonic power P

Explanation:

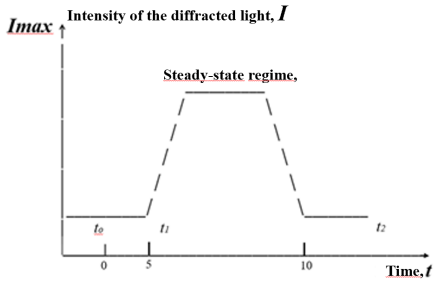
The Y-axis represents the diffraction efficiency (M1), which indicates the effectiveness of diffraction. At low ultrasonic power, M1 is small, while the X-axis represents ultrasonic power (P). For small power values (from 0 to P_1), M1 increases - often following a quadratic dependence-due to the efficient formation of the acoustic wave in the crystal. Upon reaching a

threshold power level (Psat), the effect saturates, and the efficiency η approaches its maximum value (Mmax). This is a typical characteristic of acousto-optic modules, where an optimal power level exists for achieving maximum diffraction efficiency.

Angular Resolution and Scanning: The theoretical model described by equation (9) allows the calculation of expected scanning angles and amplitude distributions. Experimental data confirmed the model's predictions with phase shift accuracy up to 0.01°. The dynamics of transient processes were studied using the wave equation (18) and the paraxial equation for the optical field (19), allowing the estimation of the time required to establish a stable diffraction pattern. Numerical models based on the finite difference method matched experimental data, demonstrating a response time of less than 10 ms.

Transient Processes in the Acousto-Optic Module: These processes are characterized by changes in the intensity or frequency spectrum of the diffracted light after the signal is applied. This is illustrated by graphs of intensity response over time and amplitude-frequency response, demonstrating the transition to a steady-state regime and frequency characteristic tuning.

Below is a schematic representation of the transient process in the acousto-optic module (Graph 2).



Graph 2. Transient processes in the acousto-optic module

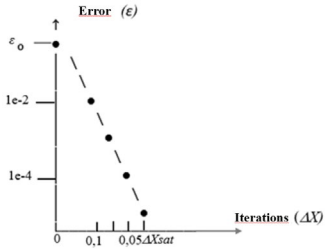
The schematic illustrates the dynamics of diffraction formation in the acousto-optic module. At time t_0, a control signal is applied, initiating the propagation of an acoustic wave within the crystal. During the transition period (t_0–t_1), the refractive index changes, leading to an increase in the intensity of the diffracted light. By time t_1, the system reaches a steady-state condition, where the light intensity stabilizes at I_{max}.

If the control signal is turned off or system parameters change, the dynamics after t_2 are characterized by variations in intensity. The duration of the transient process depends on the properties of the crystal and the speed of acoustic wave propagation, confirming the model's effectiveness and its agreement with theoretical predictions.

4.3. Validation of Mathematical Approximations

The validation of mathematical approximations was carried out by comparing analytical solutions, numerical calculations, and experimental data. For small perturbations ($\Delta n \ll n_0$), the Taylor series expansion of the diffraction angle (15) allowed for the prediction of corrections, which were confirmed by experimental measurements within the acceptable error margin.

Numerical models based on the finite difference method and Fourier decomposition demonstrated convergence as the discretization steps (Δt and Δx) were reduced, with local error estimated according to equation (16). The convergence graph of the numerical model (Graph 3) shows that decreasing the discretization steps leads to a reduction in the discrepancy between calculated and measured values, confirming the accuracy of the proposed approximations.



Graph 3. Convergence of the numerical model

The graph illustrates how reducing the discretization step (Δx) decreases the local error (ε) in accordance with estimate (16). In the initial iterations, the error (ε_0) is large, but as the number of iterations increases (to ΔX_{sat}), a minimal error level is achieved. This confirms the effectiveness of numerical methods for approximation.

Experiments conducted under extreme conditions validated the applicability of the mathematical models across a wide range of operational parameters. Graphical illustrations demonstrate the linear dependence of the diffraction efficiency on ultrasonic power, the temporal evolution of acoustic pressure (response time <10 ms), and the convergence of the numerical model. The obtained results confirm the accuracy of the applied methods for optimizing the parameters of an atmospheric acousto-optic locator with an electronic scanner.

5. Discussion of results

The developed model of the atmospheric acousto-optic locator with an electronic scanner meets military requirements for accuracy, speed, and resistance to interference. Experimental data confirmed the linear relationship between the first-order diffraction coefficient (M_1) and ultrasonic power (P) with an error margin of less than 5%. The achievable angular resolution is 0.01°, and the response time is less than 10 ms. The main advantages of the system include high

reliability due to the absence of mechanical components, but calibration complexity and dependence on external conditions remain limiting factors.

Optimization is possible through improvements in signal processing algorithms (e.g., Kalman filter, machine learning), the use of new acousto-optic crystals, and integration with electronic warfare systems. The efficiency function

$$\eta=M_1/(\sigma_R+\delta) \qquad (20)$$

where σR is the ranging measurement error, and δ is a parameter characterizing the noise level. The analysis shows that minimizing the ranging measurement error (σR) by optimizing the diffraction efficiency (M_1) enhances the overall accuracy of the system.

Conclusion

During the study, a mathematical model was developed, and the operation of the atmospheric acousto-optic locator with an electronic scanner for military purposes was substantiated.

Theoretical modeling of acousto-optic signal propagation allowed for the determination of key system parameters, while experimental data confirmed their accuracy with an error of less than 5%. Reliability and performance criteria were developed, along with recommendations for improving the locator, including enhancements in materials and signal processing algorithms.

Promising areas for future development include adaptive signal correction in complex atmospheric conditions, optimization of energy consumption for autonomous systems, and integration of the locator with other military platforms.

REFERENCES

[1] “Maxwell, J. K. & Stone, T. R. High Precision Detection Systems in Modern Warfare. Defense Technology Review, Vol. 12, No. 1, 2005, pp. 45–53.

[2] Johnson, C. R. Numerical Methods for Acousto-Optic Modeling: Finite Difference and Fourier Approaches.Computer Physics Communications, Vol. 132, 2001, pp. 89–97.

[3] Holman, M. E. Hybrid Systems: Integrating Acousto-Optical and Electronic Scanning for Military Applications. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews, Vol. 35, No. 2, 2005, pp. 217–225.

[4] Saleh B.E.A., Teich M.C. Fundamentals of Photonic. New York,Wiley,2007.-800c.

[5] Andrews L. C., Phillips R. L. Laser Beam Propagation through Random Media (2nd ed.). – Bellingham: SPIE Press, 2005. – 456 c.

[6] Tatarskii V. I., Zavorotny V. U., Vorontsov M. A. Optical Turbulence: Statistical Models and Applications – Bellingham: SPIE Press, 2008. – 350 c.

[7] Goldstein J. I., Newbury D. E., Echlin P., et al. Scanning Electron Microscopy and X ray Microanalysis. 4 е изд. – New York: Springer, 2018. – 1420 c.

[8] Skolnik M. I. Radar Handbook. 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2008. – 1072 p.

[9] .Крупельницкий Л.В. Структурные решения аналогово-цифровой системы аудиолокации и идентификации объектов на местности // Вестник Винницкого политехнического института. – 2018. – № 6. – С. 17–22. ir.lib.vntu.edu.ua

[10] Johnson M., Williams R. Accuracy and Target Identification in Modern Radar Systems.New York: IEEE Press, 2021. 310 p.

[11] Lee K. Fast Data Processing Systems in Real-Time Environments. London: IEEE Press, 2022. 300 p.

[12] Lee K., Martin S. Designing Mobile and Energy-Efficient Real-Time Systems. London: IEEE Press, 2022. 300 p.

[13] Anderson R. Numerical Analysis and Finite Difference Approximations. London: Springer, 2020. 320 p.

[14] Oppenheim A.V., Schafer R.W.Discrete-Time Signal Processing: Fourier Analysis and Applications. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2014. 800 c

[15] Gelfand I.M.,Fomin S.V.Calculus of Variations. New York:Dover Publications, 2000,350 p.

[16] Burden R.L., Faires J.D. Numerical Analysis. Boston: Brooks/Cole, 2011. 600 p.

[17] Saleh B.E.A., Teich M.C.Fundamentals of Photonics. New York: Wiley, 2007. 800 p.

[18] Ахмедов, Р.А. Переходная характеристика акустооптической линии задержки и ее применения / Р.А. Ахмедов, А.Р.Гасанов, А.Г.Гусейнов [и др.] // Физические основы приборостроения, – Москва: – 2020. т.9. №1 (35), – с.71-78.

[19] 19. Гасанов, А.Р. Фазоинвертор с разделенной нагрузкой на основе дифракции брэгга / А.Р. Гасанов, А.Г. Гусейнов, Б.Э. Гусейн-заде // 2020. Известия ВУЗОВ. Радиоэлектроника, – Киев: – 2020. Т.63 № 9, – с.580-588.

[20] Гасанов, А.Р. Использование особенностей фотоупругого эффекта для измерения параметров лазерного излучения / А.Р.Гасанов, А.Г.Гусейнов [и др.] // Радиостроение, – Москва: – 2020. № 4 (35), – с.17-29.

[21] Gasanov, A.R. Phaze inverter with Split Load on Basis of Bragg Diffraction / Afig Gasanov, Ruslan Gasanov, Ashraf Guseinov [et al.] // Journal of Radioelectronics and Communications Systems, – Luxembourg: – 2020. vol. 63, № 9, p. 497-503.

[22] Гасанов, А.Р. Акустооптические линии задержки низкочастотных и высоко - частотных электрических сигналов // Москва: Специальная техника, 2013. №1, с.23-33.

[23] Huseynov, A. Cyb Proceedings of the IX International Scientific and Theoretical Conference.-Liverpool, England, United Kingdom er threats and protection of information systems as key elements of combat readiness.2025.- p.57-66

[24] Huseynov, A. The strategic role of military communications in achieving operational success in modern combat operations. Proceedings of the VIII International Scientific and Theoretical Conference.–Bern, Swiss confederation.-2025,- p.68-76.

[25] Huseynov, A. Determination of the scanning velocity of atmospheric objects using an electronically scanned acousto-optic locator. Збірник наукових праць з матеріалами v міжнародної наукової конференції: Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики. - Кропивницький, Україна. -2025,- p.271-279

[26] Huseynov, A. Analysis of acousto-optic filter behavior in portable optical communication devices. Збірник наукових праць з матеріалами v міжнародної наукової конференції: Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики. - Кропивницький, Україна, - p.280-288.

[27] Huseynov, A..Evaluation of the effectivenss of radio jamming against radionavigation systems on combat vessels. Збірник наукових праць з матеріалами vii міжнародної наукової конференції «Інноваційні тенденції сьогодення в сфері природничих, гуманітарних та точних наук».- м. Харків, Україна, - 2025. - p.105-114

[28] Huseynov, A.İntelligent hybrid acoustic-optical system Новітні технології – для захисту повітряного простору XXI міжнародна наукова конференція харківського національного університету повітряних сил імені івана кожедуба . - Харків s for adaptive environmental monitoring.- 2025, - P 289

MCIT Modeling, control & information technologies

Prompt-Based Automation of Agile Requirements Documentation: Design for Limited-Infrastructure Environment

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.032

Roman Kruk
The Department of Computer Science and Applied Mathematics
The National University of Water and Environmental Engineering, NUWEE
Rivne, Ukraine
r.a.kruk@nuwm.edu.ua

Nataliia Zhukovska
The Department of Computer Science and Applied Mathematics
The National University of Water and Environmental Engineering, NUWEE
Rivne, Ukraine
n.a.zhukovska@nuwm.edu.ua

Abstract—**This study presents a proof-of-concept design and evaluation of a prompt-based automation approach for Agile requirements documentation in a limited-infrastructure environment. Building upon a previously proposed five-step LLM-based analytical framework, the research explores how structured prompt engineering can replicate the behavior of a full middleware system for transforming Jira exports into publishable Feature Specification Documents. The experiment involved 12 iterative prompt-refinement cycles applied to real project data. The final Gem's configuration achieved 79% successful cases (improved by 27% when project knowledge artifacts were included). The results confirm that prompt-driven automation can effectively bridge unstructured Agile artifacts and formal specification, offering a lightweight and auditable alternative to traditional requirements documentation workflows.**

Keywords — Agile, Requirements Engineering; Prompt Engineering; Large Language Models; Feature Specification; Process Automation

I. Introduction

The study addresses persistent challenges in Agile Requirements Engineering (RE), where semi-structured artifacts such as user stories and acceptance criteria often lack consistency, traceability, and integration with formal system documentation[1]. In contemporary IT practice, especially in large Agile teams, documentation quality remains a key bottleneck that affects project predictability and validation[2].

The object of research is the process of requirements analysis and transformation in Agile projects; the subject is the application of generative AI through structured prompt engineering to automate and improve that process.

The goal of this research stage is to evaluate how the previously proposed five-step LLM-based method for requirements analysis can be adapted into a prompt-only proof-of-concept (PoC) within a limited project infrastructure.

II. Context of the Study

This work continues a multi-stage research program initiated in 2023–2025, where earlier studies developed:

1. a conceptual data-flow model of Agile requirements and its bottlenecks [3];

2. the intermediary LLM-based middleware integrated with Jira and Neo4j for graph-based knowledge modeling[4]; and

3. validation of a five-step analytical framework achieving high correctness results during the first test run[5].

At the current stage, the focus shifts from full middleware deployment to manual PoC implementation within a real IT project at SoftServe Inc., constrained to only Jira, Confluence, and Gemini tools.
The study examines how the core method can operate in such low-infrastructure environments and whether carefully designed prompts (custom Gems) can reproduce the essential analytical behavior of the full system.

III. Methodology

An iterative experimental design was used, consisting of 12 consecutive prompt engineering cycles applied to real Jira epics exported from a SoftServe project. Each iteration processed 50 epics using a modified five-step requirements analysis logic.
The choice to focus on PoC implementation rather than the full middleware architecture was driven by two factors:

1. the ability to test the approach on a live corporate project under restricted infrastructure (Jira, Confluence, Gemini only), and

2. the need to validate the scientific novelty of the five-step analytical method itself, independent of system integration.

Two custom Gems were configured in Gemini: one for transforming Jira exports into Feature Specification Documents (FSD) and another for dependency analysis.

In the scope of this paper only the first prompts will be presented and described.

Custom Gems allow prompt persistence (multi-use configuration) and inclusion of knowledge artifacts — project structure, terminology, and glossary — which improve contextual accuracy. The evaluation of generated documentation was based on three quality criteria:

- Relevance - measures how well the generated Feature Specification reflects the actual content and intent of the original Jira requirements. A highly relevant document preserves business meaning, scope, and context without introducing unrelated information.
- Completeness - evaluates whether all important requirement elements (user stories, acceptance criteria, dependencies, and constraints) were captured and represented in the output. A complete document should cover every Jira item without omissions.
- Correctness - evaluates the factual and logical accuracy of the generated specification. It verifies that requirements are expressed clearly, testably, and without semantic distortion or contradictions compared to the source data.

Each scored from 1 to 5. A case was marked successful if it achieved at least 11 total points and no score below 3. This scoring framework was applied consistently across all 12 experimental iterations.

IV. Study Results

Twelve experimental iterations were conducted, each involving prompt refinement and evaluation over 50 epics. The overall trend showed progressive improvement in output quality, with the twelfth prompt achieving the highest performance (Table 1).

TABLE I. Success Results of the Iterative 'FeatureSpecificationWriter' Prompt Engineering

Iteration	Version Name	Successful Cases (%)
1	Baseline simple prompt	34
2	Added structure outline	39
3	Added FR/NFR/TR separation	44
4	Added acceptance criteria preservation	48
5	Introduced dependency section	55
6	Added risk & constraint handling	48
7	Introduced traceability table	51
8	Rewritten to improve clarity & grouping	62
9	Added normalization & clustering logic	64
10	Included Gherkin[6][7] transformation rules	67
11	Optimized contextual reasoning (project structure & overview artefacts)	72
12	Glossary knowledge artefact included (final Feature SpecificationWriter)	79

A. Design of the FeatureSpecificationWriter Gem

The FeatureSpecificationWriter (FSW) Gem serves as a reusable generative configuration designed to transform Jira-exported requirements into a clean, publishable Feature Specification Document (FSD) suitable for direct insertion into documentation systems such as Confluence or SharePoint. Its purpose is to consolidate semi-structured Agile artifacts — stories, tasks, and acceptance criteria — into a unified and formally structured specification, ensuring completeness, clarity, and traceability without the need for middleware or database integration.

The Gem operates entirely through prompt logic and controlled instruction chaining[8][9]. It replicates the analytical reasoning of the five-step requirements analysis framework proposed in previous research—clustering, linking, dependency detection, deduplication, and traceability—within a single self-contained generative process. The FSW receives one or several Jira CSV exports as input, optionally accompanied by project briefs, diagrams, or glossary files. The output is a markdown-structured FSD ready for publication. Unlike ordinary prompts that rely on transient context, the Gem configuration ensures persistence and reproducibility: it can be reused across projects while retaining the same logical behavior and section structure.

The process begins with input normalization. The Gem has a command to automatically detects field names and separators, handles quoted newlines, trims whitespace, and maps variable column labels such as Summary, Title, Description, or Acceptance Criteria to canonical categories. If any essential field is missing or ambiguously labeled, the Gem requests a header sample or infers mappings from semantic similarity. This preprocessing step guarantees compatibility across heterogeneous Jira export formats.

Next, the grouping and deduplication phase organizes tickets by their Epic link or component reference. Duplicate or fragmented tickets sharing the same summary within one epic are merged, while each issue still retains a unique traceability reference.

The content extraction and rewriting stage reads all relevant text from the Description, Acceptance Criteria, and Comments fields, preserving their full meaning while reformulating them into precise, testable requirement statements. Any uncertain or incomplete information is flagged as TBD or Open Question rather than being omitted. The Gem never introduces new facts not present in the source material, thereby minimizing hallucinations and ensuring factual fidelity.

Requirements are then classified into four categories: User-Level Requirements (ULRs) describing business capabilities in concise, outcome-oriented form; Functional Requirements (FRs) detailing system behavior, inputs, outputs, and rules; Non-Functional Requirements (NFRs) capturing performance, security, usability, and reliability constraints; and Transitional Requirements (TRs) specifying migration, rollout, and deprecation activities.

The FSW also extracts technical design notes — non-requirement information such as architectural constraints, API endpoints, or schema references — from ticket comments. These notes provide valuable engineering context but remain distinct from normative requirements. The Gem further identifies dependencies between functional units by detecting shared entities,

data sources, or API references, and records them in a dedicated section.

Each generated requirement receives a stable identifier based on its sequential position within the document. These identifiers feed into a traceability matrix mapping each requirement to its original Jira key. This matrix guarantees full coverage: every Jira ticket must appear at least once in the matrix or in the appendix.

The resulting output follows a consistent and document-friendly structure: feature overview, user-level requirements, functional requirements (with acceptance criteria and Gherkin examples), non-functional requirements, transitional requirements, technical design notes, dependencies, risks and constraints, traceability matrix, open questions and appendix.

This stable format enables instant publication and supports automated cross-linking with other documentation artifacts. Within Gemini, the FSW Gem may include adjustable parameters such as granularity (one document per epic or multi-epic aggregation), verbosity (standard or detailed), Gherkin conversion mode, and output syntax.

A key strength of the FSW Gem lies in its anti-loss design. Even poorly structured Jira tickets are represented: missing data trigger placeholders rather than omissions, and all unclassified content is archived in the Appendix. This mechanism substantially reduces information loss compared to typical single-pass summarization prompts. Empirical testing has shown that hallucinations are nearly eliminated, while the primary failure mode remains the occasional omission of low-context requirements.

B. FeatureSpecificationWriter Gem usage on Agile Project

The FeatureSpecificationWriter Gem was applied and is recommended to be applied within an Agile project that has limited automation resources for requirements engineering. Figure 1 depicts how a human Agent collaborates with the Issue Management System (Jira), the Gem, and the Document Management System (DMS) to transform exported Agile artifacts into structured knowledge.

The process begins when the Agent initiates the export of an epic or a set of issues from Jira. This step corresponds to obtaining semi-structured requirement data in CSV or similar textual form. Once the export is complete, the Agent sends this data to the Gem, which acts as the intelligent processing core.

Inside the Gem, the FeatureSpecificationWriter executes its structured reasoning chain: it parses the exported dataset, normalizes fields, groups tickets by epic or component, rewrites user stories into formalized requirements, and assembles a complete Feature Specification Document (FSD).

After processing, the Gem returns the generated FSD to the Agent. This output is immediately suitable for documentation platforms such as Confluence or SharePoint. The Agent then uploads the new specification to the Document Management System, effectively enriching it with updated project knowledge. The DMS acknowledges a successful update, confirming that the new knowledge — derived from Jira through the Gem — has been integrated into the project's documentation repository.

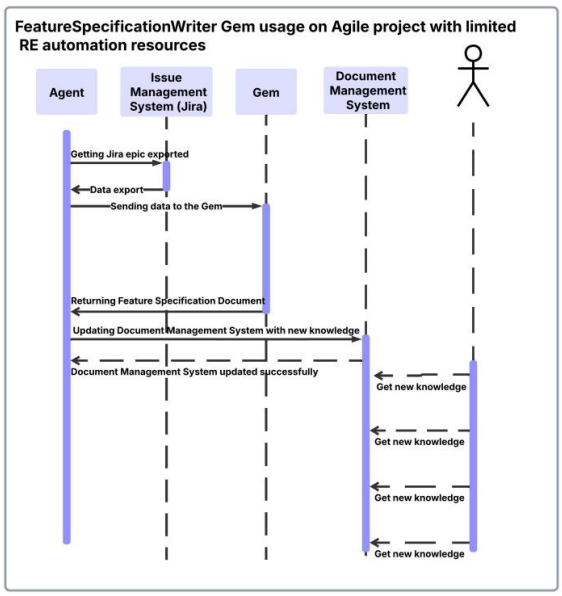


Figure 1. Sequence diagram on the FeatureSpecificationWriter Gem usage on Agile project with limited RE automation resources.

From this point onward, the user (stakeholder) interacts with the DMS to access or query this new knowledge.

V. Advantages and Constraints

A. Advantages

A primary advantage of the Gem lies in its ability to replicate a full requirements engineering pipeline within a single generative operation. This makes it especially valuable in infrastructure-limited environments, where access to graph databases or REST APIs is restricted, yet project teams still require consistent and audit-ready documentation.

Another major benefit is reproducibility. Because the Gem is configured as a reusable generative module with persistent system logic, it can be applied across projects with minimal prompt modification.

The Gem also demonstrates high interpretability and transparency compared to conventional LLM usage. By avoiding black-box automation layers, analysts can observe each conversion stage and validate results interactively.

A further advantage is contextual scalability. The inclusion of knowledge artifacts, such as project glossaries, structural ontologies, or domain context significantly enhances precision. Empirical evaluation revealed an average improvement of about 27% in document accuracy and completeness when such contextual data were preloaded into the Gem.

Lastly, the approach reduces manual workload and cognitive fatigue for business analysts.

B. Constraints

Despite its strengths, the Gem faces notable limitations. The most significant issue observed during experimentation is partial data omission: certain low-context or ambiguously worded Jira tickets may not be fully captured in the generated output. While hallucinations were almost entirely absent due to the strict "no data invention" rule, the model occasionally skips minor requirements that lack explicit acceptance criteria or functional detail. This makes post-generation review essential for ensuring completeness.

Another constraint involves manual effort in data preparation and evaluation. Because the Gem relies on exported Jira files rather than direct API integration, analysts must perform CSV normalization and upload manually.

Performance is also influenced by prompt sensitivity. Minor variations in phrasing, order, or emphasis within the system prompt may affect output consistency. Maintaining stability across Gem versions requires careful version control and continuous prompt engineering refinement.

Lastly, while contextual grounding improves output quality, it also raises dependency on knowledge artifacts. Outdated or incomplete project glossaries may bias the Gem's interpretation, resulting in incorrect term mappings or missed dependencies.

C. Novelty Compared to Classical Agile RE

The application of the FeatureSpecificationWriter Gem represents a paradigm shift from conventional Agile documentation practices, which typically depend on human interpretation and loosely structured user stories. In standard Agile workflows, documentation evolves organically through tickets, often leading to inconsistencies, duplication, and weak traceability. The Gem introduces a formalized, LLM-driven synthesis layer that consolidates all relevant artifacts into a single, structured knowledge representation while preserving their semantic integrity.

Moreover, the Gem's modular architecture, based entirely on prompt logic rather than code, makes it adaptable and transparent, allowing analysts to fine-tune reasoning steps without modifying system infrastructure.

VI. Conclusions

This research stage demonstrated the technical feasibility of applying the five-step LLM-based requirements analysis method through prompt engineering alone, without middleware integration.
By configuring reusable Gemini Gems with embedded project knowledge and a structured Feature Specification prompt, analysts achieved over 70% document correctness and completeness under limited infrastructure conditions.

In summary, the Gem serves as a semantic bridge between unstructured issue-tracking data and structured documentation. It enables manual yet repeatable automation: the Agent provides input and validation, Jira serves as the data source, the Gem performs generative reasoning, and the DMS becomes the persistent knowledge base. Even in the absence of full middleware or graph-database integration, this lightweight workflow ensures continuous transformation of Agile artifacts into formalized, accessible, and reusable project knowledge.

Future work will focus on engineering an advanced Gem capable of autonomously analyzing and maintaining internal knowledge of functional and data dependencies between system components — operating fully locally, without relying on external databases or persistent storage.

This will complete the transition from static prompt templates to adaptive, context-aware AI assistants for requirements management.

Acknowledgment

The author expresses sincere gratitude to SoftServe Inc. for providing access to real Agile project environments, infrastructure, and professional expertise that made this research possible.

References

[1] Hoy Z., Xu M. Agile software requirements engineering challenges-solutions–a conceptual framework from systematic literature review. Information. 2023. Vol. 14, no. 6. P. 322. URL: https://doi.org/10.3390/info14060322 (date of access: 29.09.2025).

[2] I. Inayat et al. A systematic literature review on agile requirements engineering practices and challenges. Computers in human behavior. 2015. Vol. 51. P. 915–929. URL: https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.10.046 (date of access: 29.09.2025).

[3] Kruk R., Zhukovska N. Analysis of bottleneck points based on the software requirements data-flow model in Agile projects. Mathematical Modelling and Computing. 2025. Vol. 12, no. 2. P. 628-639. URL: https://doi.org/10.23939/mmc2025.02.628 (date of access: 04.10.2025).

[4] Kruk R., Zhukovska N. Toward AI-assisted Framework for Agile Requirement Knowledge Management: Five-Stage Generative LLM Approach. 2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies., in press.

[5] Kruk R., Zhukovska N. Five-step Semantic Analysis Middleware for Atlassian Jira Software Requirements Transformation using Generative Large Language Model. 2025: Mathematical and computer modelling. Series: Technical sciences. Vol. 27. P. 40-57. URL: https://doi.org/10.32626/2308-5916.2025-27.40-57 (date of access: 04.10.2025) [in Ukrainian].

[6] C. Lauer, C. Sippl. Benefits of Behavior Driven Development in Scenario-based Verification of Automated Driving. 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). URL: https://doi.org/10.1109/ITSC55140.2022.9922498 (date of access: 29.09.2025).

[7] Nic Werner. Writing User Stories With Gherkin. URL: https://medium.com/@nic/writing-user-stories-with-gherkin-dda63461b1d2 (date of access: 29.09.2025).

[8] Leon Nichols. The Ultimate Guide to Google Gemini Gems. URL: https://leonnicholls.medium.com/the-ultimate-guide-to-google-gemini-gems-78182be784af (date of access: 29.09.2025).

[9] A. Kale et al. Unveiling the Power of AI Prompt Engineering: A Comprehensive Exploration. International Conference Electrical Energy Systems. 2024. URL: https://doi.org/10.1109/ICEES61253.2024.10776884 (date of access: 29.09.2025).

Digitalized urban transport system in small cities

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.033

Konul Samadova
State University Mingechevir
Mingechevir, Azerbaijan
konul.zabitqizi.i@gmail.com

Abstarct — **Small cities face growing transport challenges due to urbanization and increasing mobility demands. Limited infrastructure and resource often hinder efficient transport management. Digitalization offers opportunities to enhance mobility, optimize routes, and improve commuter staus faction.**

INTRODUCTION

Transportation digitalization is the process of using digital technologies to improve the operations, services and products of a transportation organization. In the automotive industry, digitalization has had a positive impact on safety, efficiency and cost reduction.

The transport system plays a crucial role. The economic and social health of an urban area depends to a large extent on the performance of its transport system. "The transport system not only provides the means for the mobility of people and goods, but also influences growth patterns and the level of economic activity over time through the accessibility it provides to land. The people who use the urban transport system every day partly determine how successful a transport plan really is. In addition, a successful transport plan should be attractive to customers who no longer use the public transport system and should discourage potential customers from private transport.

II. OBJECTIVE

This study investigates the implementation of digitalized urban transport systems in small cities, highlighting potential benefits, challenges and stratigias for effective adoption.

Improving efficiency and passenger satisfaction in urban transport is one of the main priorities of modern urbanization processes. The shortcomings of traditional ticketing systems—such as the inability to accurately predict delays, long waiting times, high management costs, and limited accessibility for users—create the need for innovation in this area. The article discusses a project aimed at digitalizing urban transport. The project is designed to improve the quality of public transport services through real-time route tracking, electronic ticket purchasing, and digital data analytics. It is intended to be implemented in the city of Mingachevir, Azerbaijan. Approaches to digitalizing urban transport vary worldwide. Successful models include transport system networks established in countries such as Austria, the UK, and Denmark. Austria's Wiener Linien can be considered one of the most successful examples.

Implementing such projects in small cities provides many practical and strategic advantages. Compared to large metropolises, intervals between trips may be longer in smaller cities; purchasing electronic tickets can reduce printing costs, the need for inspectors, and additional cashiers. The use of large buses to transport residents can enhance both safety and transparency, strengthening trust among citizens as well as tourists. This system will also enable visitors (tourists) to plan their routes to city attractions in advance and arrive at specific locations at the exact scheduled time.

The startup project aims to increase the efficiency of urban transport by developing a user-oriented mobile application and server infrastructure. The project targets real-time route planning of ground transport vehicles (intra-city buses, trams, metro, as well as intercity transport), as well as improving and updating passenger experience through electronic tickets and user data analytics. The technical implementation will be built on OpenStreetMap, GTFS/GTFS-realtime (GTFS – General Transit Feed Specification is an open

standard used by public transport agencies to share information about routes, schedules,stops, and geographic data), routing engines (OSRM/GraphHopper), and modern mobile.cloud architecture. The project will be evaluated using metrics that demonstrate reduced average waiting time, more efficient use of passenger time, increased user satisfaction, and reduced operational costs.

III. CREATION SYSTEM

Key considerations in creating the system:

- Collecting existing transport data in a structured way and creating data flows compatible with GTFS/GTFS-realtime;

- Developing a user-friendly mobile app with multimodal route planning;

- Building a monitoring and alert system for real-time positions and delays;

- Implementing an electronic ticketing system (QR/token), payment integration, and validation mechanisms;

Measuring system impact through pilot testing—waiting time, on-time arrival rate, user satisfaction.

MVP (Minimum Viable Product) functionalities of the project:

- User registration

- Route planner

- Real-time arrival information

- Static schedules and stop search

- Electronic tickets (purchase and validation)

- Delay and movement notifications (push notifications)

- Admin panel – live map monitoring + basic analytics for operators

OpenStreetMap can be used (to identify stops and define the road network), and GPS devices should be installed in vehicles for project implementation. For accessibility and passenger comfort monitors should also be installeds in vehicles tpo display real time route maps.

The startup project can generate revenue through ticket commissions, subscription services, and advertising placements.

This project aims to improve the urban transport system, reduce environmental pollution through increased use of public transport, and lower citizens' transportation costs. In this system, special discounted cards can be created for students, seniors, and socially

disadvantaged groups. As in global practice, citizens can also be provided with annual, quarterly, or monthly

special cards. Wider use of public transport will also help reduce traffic congestion in cities.

IV. Results

Digital Transport systems improve route planning, reduce waiting times, provide real time information. Challenges include budget limititations, technical expertise gaps, resistance to change.

Digitalization can significantly improve mobility and sustainability in small cities. effective adoption requires strategic planing, stakeholder engagement and gradual technological integration. Future research should explore scalable and regionally integrated solutions.

REFERENCES

[1] https://www.researchgate.net

[2] https://www.innovationnewsnetwork.com

[3] https://www.sciencedirect.com/journal/transportation-engineering

MCIT
Modeling, control & information technologies

Статистичне моделювання та встановлення двосторнніх критичних областей для розв'язків параболічних задач за експериментальних даних на границі тіла

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.034

Юрій Білущак
Відділ числових методів математичної фізики
Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАНУ
Кафедра обчислювальної математики і програмування
Національний університет "Львівська політехніка",
Львів, Україна
byixx13@gmail.com

Ольга Чернуха
Відділ числових методів математичної фізики
Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАНУ
Кафедра обчислювальної математики і програмування
Національний університет "Львівська політехніка",
Львів, Україна
zaliznuchna6@gmail.com

Галина Білущак
Кафедра обчислювальної математики і програмування
Національний університет "Львівська політехніка",
Львів, Україна
halyna.i.bilushchak@lpnu.ua

Abstract — **Проведено статистичне моделювання процесів переносу в шарі з неповними даними на границі тіла. Крайова задача сформульована для випадку ненульової початкової умови, наявності сталого джерела на одній границі тіла (класична гранична умова) та вибірки експериментальних даних для шуканої функції на іншій границі (статистична гранична умова). Як гранична умова використовується модель лінійної регресії, отримана з експериментальних даних методом найменших квадратів. Записано матрицю регресорів, отримано інформаційну матрицю та матрицю помилок. На цій основі одержано формули та проаналізовано двосторонню критичну область на основі критерію Фішера. Проаналізовано вплив рівня надійності на ширину двосторонньої критичної області, побудованої для регресії та розв'язку задачі.**

Ключові слова — процес перенесення; статистичне моделювання; експериментальні дані; крайова задача; двостороння критична область

I. Вступ

Різноманітні задачі інженерії, екології, біології, фармакології та низка інших технічних та технологічних досліджень потребують подальшого розвитку підходів і методів математичного опису нерівноважних процесів різної фізичної природи в природних або штучних об'єктах [1]. Актуальність вказаних вище проблем спричинена необхідністю побудови ефективних методик і оцінок для прогнозування розподілу забруднень техногенного походження, оцінці якості питної води та покращення її очистки в промислових масштабах, встановленні впливу дифузії лікарських препаратів в тканину, дифузії агресивних речовин при оцінці надійності та довговічності експлуатації елементів і вузлів конструкцій для запобігання руйнування відповідних матеріалів тощо. В низці задач такої природи актуальними є методи статистичного моделювання, які поєднують класичні підходи математичного моделювання та методи математичної статистики. Такі дослідження дозволяють отримувати достовірний прогноз процесів, які протікають в об'єктах навколишнього середовища, вузлах промислового обладнання, людському організмі тощо та вчасно вживати необхідні заходи для запобігання їх негативного розвитку. Основні підходи та методи статистичного моделювання розвиваються доволі бурхливо протягом останніх декількох десятиліть та базуються на необхідності розв'язування та аналізу практичних задач [2, 3].

У роботі розглядається крайова задача параболічного типу, що описує процеси перенесення – тепла, маси, заряду, тощо, в шарі, коли на одній з границь наявні експериментальні дані щодо шуканої функції за ненульової початкової умови. Основною є розвиток та узагальнення методики, викладеної в [4]. Зокрема, ефективну методику встановлення двосторонніх критичних областей для розв'язків параболічних диференціальних рівнянь за експериментальних даних на границі тіла та досліджено вплив на них рівня надійності.

II. Модель процесів перенесення у шарі за експериментальних даних на границі

Нехай в шарі товщини z_0 протікає процес, який описується функцією $u(\tau, z)$, що є розв'язком диференціального рівняння другого порядку в частинних похідних [5]

$$\frac{\partial u(\tau,z)}{\partial \tau} = A\frac{\partial^2 u(\tau,z)}{\partial z^2}, \qquad (1)$$

де A - сталий коефіцієнт, τ - час, z - просторова координата.

Приймаємо, що в початковий момент

$$u(\tau,z)\big|_{\tau=0} = u_0 \equiv const, \qquad (2)$$

а для $\tau > 0$ на верхній поверхні шару діє стале джерело:

$$u(\tau,z)\big|_{z=0} = u_* \equiv const. \qquad (3)$$

На нижній границі шару значення функції $u(\tau,z)$ отримані експериментально в n моментах часу (табл. 1).

Таблиця I. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ НА НИЖНІЙ ГРАНИЦІ ШАРУ

τ	τ_1	τ_2	…	τ_i	…	τ_n
$u(\tau)\big\|_{z_0}$	$u_{z_0}(\tau_1)$	$u_{z_0}(\tau_2)$	…	$u_{z_0}(\tau_i)$	…	$u_{z_0}(\tau_n)$

Тоді будуємо лінійну регресійну модель [6, 7], шукаючи її коефіцієнти методом найменших квадратів [8]

$$f(\tau) = a_1\tau + a_0. \qquad (4)$$

В результаті гранична умова при $z = z_0$ набуде вигляду

$$u(\tau,z)\big|_{z=z_0} = f(\tau). \qquad (5)$$

Зводимо задачу (1)-(3), (5) до задачі з нульовими граничними умовами і застосовуємо скінченне інтегральне sin-перетворення Фур'є. В результаті отримаємо розв'язок в загальному випадку у вигляді

$$u(\tau,z) = u_*\left(1-\frac{z}{z_0}\right) + f(\tau)\frac{z}{z_0} +$$
$$+\frac{2}{z_0}\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\frac{(-1)^m}{y_m}f(\tau) + \frac{e^{-Ay_m^2\tau}}{y_m}\left(u_0 - u_* + (-1)^{m+1}u_0 + \right.\right.$$
$$+(-1)^m Ay_m^2\int f(\tau)e^{Ay_m^2\tau}d\tau\Big|_{\tau=0} -$$
$$\left.\left.-(-1)^m Ay_m^2\int f(\tau)e^{Ay_m^2\tau}d\tau\right)\right\}\sin(y_m z). \qquad (6)$$

Враховуючи, що $f(\tau)$ є лінійною регресією, маємо

$$u(\tau,z) = u_*\left(1-\frac{z}{z_0}\right) + (a_1\tau + a_0)\frac{z}{z_0} +$$
$$+\frac{2}{z_0}\sum_{m=1}^{\infty}\left\{a_1\frac{(-1)^m}{Ay_m^3} + \frac{e^{-Ay_m^2\tau}}{y_m}\times\right.$$
$$\left.\times\left[u_0 - u_* + (-1)^{m+1}u_0 + (-1)^m\left(a_0 - \frac{a_1}{Ay_m^2}\right)\right]\right\}\sin(y_m z), \qquad (7)$$

де $y_m = m\pi/z_0$.

Оскільки вибірка експериментальних даних для шуканої функції задана на проміжку $\tau\in[0,\tau_n]$, тому отримана формула (7) справедлива на цьому часовому проміжку.

III. ДВОСТОРОННЯ КРИТИЧНА ОБЛАСТЬ ДЛЯ ПРОГНОЗОВАНОГО ЗНАЧЕННЯ ПОБУДОВАНОЇ ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ФУНКЦІЇ $f(\tau)$

Щоб встановити двосторонню критичну область для функції $u(\tau,z)$ - розв'язку крайової задачі (1)-(3), (5) спочатку за методикою, наведеною в роботі [7], знайдемо двосторонню критичну область для лінійної регресії $f(\tau)$ (4).

За заданим рівнем значущості α визначаємо рівень надійності $\beta = 1-\alpha$. За таблицею експериментальних даних (Табл. 1) записуємо матрицю регресорів $\aleph$, яка для цього випадку має вигляд

$$\aleph^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \tau_1 & \tau_2 & \tau_3 & \dots & \tau_n \end{pmatrix}.$$

Для прогнозованого значення лінійної регресії $f(\tau)$ дисперсія визначається за формулою

$$\sigma_f^2 = \mathbf{f}_\tau^T(\aleph^T\aleph)^{-1}\mathbf{f}_\tau\sigma_\tau^2, \qquad (8)$$

де $\mathbf{f}_\tau^T = \begin{pmatrix}1 & \tau\end{pmatrix}$.

Шукану двосторонню критичну область для $f(\tau)$ отримаємо, підставляючи оцінку середнього квадратичного відхилення σ_f (8) у вираз $\left|\widehat{f}(\tau) - f(t)\right|/\sigma_f$. Тоді істинне значення шуканої функції на нижній границі $f(\tau)$ з ймовірністю β змінюється в межах [7]:

$$\widehat{f}(\tau) - \tau_\alpha\sigma_\tau\sqrt{\mathbf{f}_\tau^T(\aleph^T\aleph)^{-1}\mathbf{f}_\tau} \le f(\tau) \le$$
$$\le \widehat{f}(\tau) + \tau_\alpha\sigma_\tau\sqrt{\mathbf{f}_\tau^T(\aleph^T\aleph)^{-1}\mathbf{f}_\tau}. \qquad (9)$$

Детермінант інформаційної матриці

$$(\aleph^T\aleph) = \begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n\tau_i \\ \sum_{i=1}^n\tau_i & \sum_{i=1}^n\tau_i^2 \end{pmatrix},$$

отримано у формі

$$\det(\aleph^T\aleph) = n\sum_{i=1}^n\tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n\tau_i\right)^2.$$

Тоді матрицю помилок отримаємо у вигляді

$$(\aleph^T\aleph)^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{i=1}^n\tau_i^2}{n\sum_{i=1}^n\tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n\tau_i\right)^2} & \frac{-\sum_{i=1}^n\tau_i}{n\sum_{i=1}^n\tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n\tau_i\right)^2} \\ \frac{-\sum_{i=1}^n\tau_i}{n\sum_{i=1}^n\tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n\tau_i\right)^2} & \frac{n}{n\sum_{i=1}^n\tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n\tau_i\right)^2} \end{pmatrix}.$$

Зазначимо, що довжини двосторонніх критичних областей будуть різними у різних точках факторного простору, оскільки в цих точках різними є вектори $\mathbf{f}_\tau$, тобто точність прогнозованого значення лі-

нійної регресії $f(\tau)$ може відрізнятися у різні моменти часу τ.

Знайдемо межі двосторонньої критичної області для функції $f(\tau)$. Нехай

$$f(\tau) = \hat{f}(\tau) \pm \Delta_f \tilde{f}(\tau), \qquad (10)$$

де у випадку лінійної регресії, що випливає з формули (9), маємо

$$\hat{f}(\tau) = a_1\tau + a_0, \quad \Delta_f \tilde{f}(\tau) = B\sqrt{p_1 + p_2\tau + p_3\tau^2}.$$

Тут

$$p_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\tau_i^2}{n\sum_{i=1}^{n}\tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}\tau_i\right)^2}, \quad p_2 = \frac{-2\sum_{i=1}^{n}\tau_i}{n\sum_{i=1}^{n}\tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}\tau_i\right)^2},$$

$$p_3 = \frac{n}{n\sum_{i=1}^{n}\tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}\tau_i\right)^2}; \quad B = \tau_\alpha \sigma_f. \qquad (11)$$

Зазначимо, що "+" у формулі (10) відноситься до верхньої межі критичної області, а "-" – до нижньої.

Дослідивши вплив параметра n на коефіцієнти p_i, $i = 1,2,3$ (11), зазначимо, що якщо зростає кількість вимірів n, то ці коефіцієнти зменшуються, причому

$$\lim_{n\to\infty} p_1(n) = \lim_{n\to\infty} p_2(n) = 0, \quad \lim_{n\to\infty} p_3 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\tau_i^2}.$$

Тоді збільшення кількості експериментів n на тому самому проміжку $\tau \in [0;\tau_n]$ за сталого значення σ_τ призводить до звуження двосторонньої критичної області (9), в якій з ймовірністю β потрапляють експериментальні дані. Тоді як збільшення середньо квадратичного відхилення σ_τ величини τ, за однакової кількості вимірів n веде до збільшення двосторонньої критичної області для функції лінійної регресії $f(\tau)$. Зазначимо, що вплив дисперсії змінної τ на двосторонню критичну область є аналогічним до впливу σ_τ, проте зростання на/в одне і те саме число сповільнює швидкість зростання цього інтервалу.

Також відмітимо, що, оскільки коефіцієнт B є прямо пропорційний значенню критерію Стьюдента τ_α, то при зростанні рівня надійності β збільшується значення коефіцієнта B.

IV. Встановлення двосторонньої критичної області для розв'язку крайової задачі

Підставивши у співвідношення (6) представлення функції $f(\tau)$ (10) отримаємо межі двосторонньої критичної області для розв'язку крайової задачі (1)-(3), (5)

$$u_f^{\pm}(\tau,z) = u_*\left(1-\frac{z}{z_0}\right) + \hat{f}(\tau)\frac{z}{z_0} \pm \Delta_f\tilde{f}(\tau)\frac{z}{z_0} +$$

$$+\frac{2}{z_0}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\frac{(-1)^m}{y_m}\hat{f}(\tau) \pm \frac{(-1)^m}{y_m}\Delta_f\tilde{f}(\tau) + \frac{e^{-Ay_m^2\tau}}{y_m}\times\right.$$

$$\times\left(u_0 - u_* + (-1)^{m+1}u_0 + (-1)^m Ay_m^2\int \hat{f}(\tau)e^{Ay_m^2\tau}d\tau\Big|_{\tau=0} \pm\right.$$

$$\pm(-1)^m Ay_m^2\int \Delta_f\tilde{f}(\tau)e^{Ay_m^2\tau}d\tau\Big|_{\tau=0} -$$

$$-(-1)^m Ay_m^2\int \hat{f}(\tau)e^{Ay_m^2\tau}d\tau \mp$$

$$\left.\left.\mp(-1)^m Ay_m^2\int \Delta_f\tilde{f}(\tau)e^{Ay_m^2\tau}d\tau\right)\right\}\sin(y_m z). \qquad (12)$$

У випадку накладання лінійної регресії як умови на нижній границі шару, враховуючи формулу (6), можемо подати формулу (12) у вигляді

$$u_f^{\pm}(\tau,z) = u(\tau,z) \pm \Delta_f\tilde{f}(\tau)\frac{z}{z_0} \pm$$

$$\pm\frac{2}{z_0}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\frac{(-1)^m}{y_m}\Delta_f\tilde{f}(\tau) + \right.$$

$$+\frac{e^{-Ay_m^2\tau}}{y_m}\left((-1)^m Ay_m^2\int \Delta_f\tilde{f}(\tau)e^{Ay_m^2\tau}d\tau\Big|_{\tau=0} -\right.$$

$$\left.\left.-(-1)^m Ay_m^2\int \Delta_f\tilde{f}(\tau)e^{Ay_m^2\tau}d\tau\right)\right\}\sin(y_m z).$$

Тут $\Delta_f\tilde{f}(\tau)\Big|_{\tau=0} = B\sqrt{p_1}$.

Неозначені інтеграли $\int \Delta_f\tilde{f}(\tau)e^{-Ay_m^2\tau}d\tau\Big|_{\tau=0}$ та $\int \Delta_f\tilde{f}(\tau)e^{-Ay_m^2\tau}d\tau$ не беруться в елементарних функціях, тоді знайдемо їх наближені вирази. Оскільки функція $\Delta_f\tilde{f}(\tau)$ є неперервно-диференційованою потрібну кількість разів, розкладемо її в ряд Тейлора на проміжку заданих експериментальних вимірювань $\tau \in [0,\tau_n]$ в околі деякої точки t з цього проміжку:

$$\Delta_f\tilde{f}(\tau) = B\sqrt{p_1 + p_2\tau + p_3\tau^2} =$$

$$= B\sqrt{p_1 + p_2 t + p_3 t^2} + B\frac{\tau - t}{1!}\frac{(p_2 + 2p_3 t)}{2\sqrt{p_1 + p_2 t + p_3 t^2}} +$$

$$+B\frac{(\tau - t)^2}{2!}\frac{4p_3p_1 - p_2^2}{4\left(p_1 + p_2 t + q_3 t^2\right)^{\frac{3}{2}}} + \ldots + R_n(\tau).$$

У випадку

$$\Delta_f\tilde{f}(\tau) \approx A_3\tau^2 + \tilde{b}\tau + \tilde{p},$$

де $\tilde{p} = A_1 - A_2a_1 + A_3a_1^2$, $\tilde{b} = (A_2 - 2A_3a_1)$, для двосторонньої критичної області отримаємо такі межі

$$u_f^{\pm}(\tau,z) = u(\tau,z) \pm 2B\sqrt{p_1 + p_2\tau + q_3\tau^2}\,\frac{z}{z_0} \pm$$

$$\pm\frac{2}{z_0}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^m}{y_m}e^{-Ay_m^2\tau}\times$$

$$\times\left(2B\sqrt{p_1}+A_3\tau^2+\widetilde{b}\,\tau-2\frac{(A_3\tau+\widetilde{b})}{Ay_m^2}\right)\sin(y_m z).$$

Врахуємо, що

$$\lim_{\tau\to\infty}u_f^{\pm}(\tau,z)=\lim_{\tau\to\infty}u(\tau,z)\pm 2B\sqrt{p_1+p_2\tau+p_3\tau^2}\,\frac{z}{z_0}.$$

Тоді для великих часів протікання процесу, який описується вихідною крайовою задачею, чим більше τ тим більшою є ширина двосторонньої критичної області, тобто функції $u_f^{\pm}(\tau,z)$ не мають стаціонарного режиму (часової асимптотики).

На ширину двосторонньої критичної області найбільший вплив має коефіцієнт B. Зокрема, чим менше значення $|B|$, тим вужча двостороння критична область для того самого рівня надійності β. І тим ширша двостороння критична область, чим більша дисперсія прогнозованого значення лінійної регресії $f(\tau)$.

V. Вплив статистичних характеристик вибірки на двосторонню критичну область розв'язку крайової задачі

Проаналізуємо вплив статистичних характеритик вибірки експериментальних даних на шукану функцію на нижній границі шару на конкретних прикладах. За базові параметри прийнято $A=1$, $u_*=1$, $u_0=0$, $z_0=1$. В розрахункових формулах ряди обчислені з точністю $\varepsilon=10^{-7}$.

На рис. 1 за даними табл. II і рис. 2 за даними табл. III наведено розв'язки крайової задачі $u(\tau,z)$, які нормовано на значення функції на верхній границі шару $z=0$, та відповідні двосторонні критичні області, обчислені за критерієм Фішера, для $\tau=0.1$ (рис. a) і $\tau=0.5$ (рис. b). Тут криві 2-, 2+ обчислені для $\beta=0.9$, криві 3-, 3+ - для $\beta=0.95$, криві 4-, 4+ - для $\beta=0.99$.

Мала вибірка, великий часовий інтервал, велика дисперсія

Таблиця II. Експериментальні дані з великою дисперсією для великого часового інтервалу

	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_7	τ_8	τ_9	τ_{10}	τ_{11}	τ_{12}
τ_i	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3	3.3
$f(\tau_i)$	0	0.1697	0.4738	1.0209	1.4735	1.9513	2.4972	2.7988	2.9986	3.3457	3.8914	4.4371

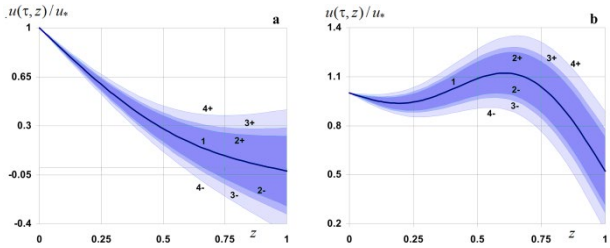


Рисунок 1. Розв'язки крайової задачі $u(\tau,z)$ та відповідні двосторонні критичні області для $\tau=0.1$ (рис. a) і $\tau=0.5$ (рис. b)

Мала вибірка, малий часовий інтервал, велика дисперсія

Таблиця III. Експериментальні дані з великою дисперсією для малого часового інтервалу

	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_7	τ_8	τ_9	τ_{10}	τ_{11}	τ_{12}
τ_i	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
$f(\tau_i)$	0	0.0162	0.5809	1.1439	2.2175	3.2737	3.6345	4.1847	4.8021	5.1542	5.5129	5.9291

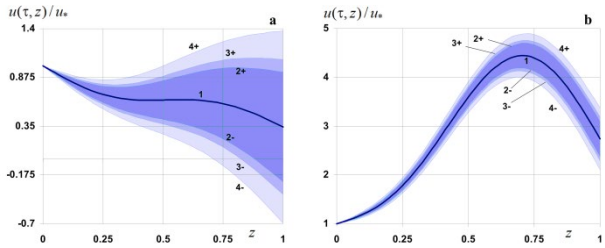


Рисунок 2. Розв'язки крайової задачі $u(\tau,z)$ та відповідні двосторонні критичні області для $\tau=0.1$ (рис. a) і $\tau=0.5$ (рис. b)

VI. Висновки

Сформульовано крайову задачу перенесення для шару з ненульовою початковою умовою, дією стаціонарного джерела на одній межі тіла та вибіркою експериментальних даних щодо шуканої функції на іншій. На основі експериментальних даних побудована лінійна регресійна модель методом найменших квадратів, яка розглядається як гранична умова. Розв'язок крайової задачі знайдено застосуванням скінченного інтегрального перетворення Фур'є.

Отримано та проаналізовано формулу для визначення двосторонньої критичної області на основі критерію Фішера. На конкретних прикладах досліджено вплив статистичних характеристик вибірки експериментальних даних на шукану функцію на нижній межі шару. Розглянуто випадки вибірок з великими та малими об'ємами, що характеризуються великою або малою дисперсією, на великих або малих інтервалах часу.

Література

[1] J. Moffatt, P. Scarf, "Sequential regression measurement error models with application," Statistical Modelling. 2016, vol.16, pp. 454–476.

[2] A.E. Sikaroudi, C. Park, "A mixture of linear-linear regression models for a linear-circular regression,". Statistical Modelling. 2019, vol.21, pp. 220–243.

[3] R.R. Wilcox, "Linear regression: Robust heteroscedastic confidence bands that have some specified simultaneous probability coverage," Journal of Applied Statistics. 2017, vol. 44, pp. 2564–2574.

[4] O. Chernukha, P. Pukach, H. Bilushchak, Y. Bilushchak, M. Vovk, "Advanced Statistical Approach for the Mathematical Modeling of Transfer Processes in a Layer Based on Experimental Data at the Boundary," Symmetry 2024, vol. 16(7), 802. –34p

[5] M. Apostol, "Equations of Mathematical Physics," Cambridge Scholars Publishing: Newcastle upon Tyne, UK, 2018; 250 p.

[6] V.E. Bakhrushin, "Methods of Data Analysis," KPU: Zaporizhzhia, Ukraine, 2011, 268 p.

[7] I. Vuchkov, L. Boyadzhieva, E. Solakov, "Applied Linear Regression Analysis; Financy i Statistika: M, R., 1987; 238 p.

[8] E.J. Gumbel, "Statistics of Extremes," Dover Publications: Chicago, IL, USA, 2004; 400 p.

MCIT Modeling, control & information technologies

Об'єктно-орієнтовані мережі Петрі та можливості їх аналізу формальними методами

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.035

Олексій Весельський
Черкаський національний університет
імені Богдана Хмельницького
м. Черкаси, Україна
veselskyi.oleksii1118@vu.cdu.edu.ua

Анотація — **В роботі обгрунтована актуальність застосування візуально-аналітичного моделювання для перевірки коректності функціонування програмних систем та мереж Петрі (PN), як одного з методів такого моделювання. Описана об'єктно-орієнтована інтерпретація мереж Петрі (OOPN) та проаналізовані наукові роботи, що пропонують реалізації об'єктно-орієнтованих PN. Поставлена проблема відсутності формальних методів аналізу, адаптованих до OOPN.**

Ключові слова — моделювання програмної системи, мережа Петрі, PN-модель програмної системи, об'єктно-орієнтована мережа Петрі

I. Вступ

Розробка програмного забезпечення є складним комплексним процесом, в ході якого можливе виникнення непередбачуваних труднощів. Однією з можливих відповідей на ці труднощі є моделювання програмної системи на етапі проектування. Моделювання дозволяє заранні перевірити побудований проект програмного засобу на правильність і відповідність специфікації, зокрема перевірити коректність роботи спроектованих алгоритмів та їх інтеграцію в систему. Завдяки такій перевірці можна своєчасно виявити потенційні недоліки, що можуть спричинити некоректну поведінку системи [1]. Це дозволяє уникнути додаткових витрат часу та фінансів на виправлення таких помилок під час або після етапу розробки.

Неухильне зростання складності нових розроблюваних програмних систем тільки збільшує важливість використання моделювання. Зокрема, багато сучасних систем складаються з великої кількості паралельних конкуруючих процесів [2]. Такий паралелізм створює підґрунтя для виникнення непередбачуваних сценаріїв функціонування програмного забезпечення (ПЗ) та прихованих помилок, які складно виявити без застосування методів моделювання.

II. Мережі Петрі

Одним з методів моделювання, які дозволяють вирішувати названі проблеми, є мережі Петрі. Вони належать до парадигми динамічного моделювання та мають чіткий математичний опис. Це дозволяє досліджувати динамічні властивості моделі, побудованої на мережах Петрі, наприклад, за допомогою інваріантного аналізу. Таке дослідження дає змогу виявляти наявні в системі приховані помилки. [2]

Мережі Петрі поділяються на різні класи (інтерпретації) [3]. Серед них є базові, такі як безпечні або оціночні мережі Петрі, та прикладні, такі як кольорові мережі Петрі. Необхідність створення більш складних прикладних інтерпретацій зумовлена виникненням задач, з якими класичні мережі Петрі не здатні впоратися достатньо якісно, зокрема вже згадане зростання складності програмних систем. Відмінною властивістю, наприклад, кольорових мереж Петрі є те, що мітки можуть мати різні кольори, кожен з яких відображає різні значення [4]. Це дозволяє зручніше та точніше моделювати складні системи, по яких циркулює різна інформація.

Ще одним варіантом прикладної інтерпретації мереж Петрі є їх поєднання з парадигмою об'єктно-орієнтованого програмування (ООП). Оскільки сьогодні ООП широко використовують в розробці ПЗ, то об'єктно-орієнтовані мережі Петрі безумовно можуть бути корисними для моделювання такого ПЗ.

III. Об'єктно-орієнтовані інтерпретації PN

Різні науковці неодноразово пропонували ідеї поєднання ООП та мереж Петрі, наприклад [5], [6], [7], [8].

В [5] автори пропонують концепцію об'єктно-орієнтованих мережі Петрі, яка передбачає моделювання об'єктно-орієнтованої програмної системи шляхом побудови для кожного об'єкту та методу системи відповідно мереж об'єктів і мереж методів. Зазначається, що ця інтерпретація мережі Петрі є формальним засобом моделювання, який дозволяє перевіряти коректність роботи системи як за допомогою симуляції, так і формальними методами. Втім, немає згадок про те, які саме методи формального аналізу можна застосувати та як це зробити.

В [8] пропонується інший підхід до побудови об'єктно-орієнтованих моделей на мережах Петрі.

Систему спершу моделюють в об'єктно-орієнтованій парадигмі, після чого трансформують в модель на кольорових мережах Петрі, відображаючи у вигляді мереж класи та об'єкти. Передбачені також механізми реалізації в моделі таких об'єктно-орієнтованих концепцій, як інкапсуляція та наслідування. Автори також згадують про можливість формальної перевірки таких моделей, зазначаючи, що об'єктно-орієнтовану мережу Петрі можна перетворити в кольорову мережу Петрі та проаналізувати її. Втім, жодних детальніших пояснень щодо такого перетворення немає.

В [6] запропоновано об'єктно-орієнтовані кольорові мережі Петрі. Це ще одна інтерпретація, основою якої є кольорові мережі Петрі, до яких автори додають об'єктно-орієнтовані компоненти. Систему пропонують ділити на елементи, кожен з яких представлений мережею Петрі і може комунікувати з іншими елементами. Стаття розглядає можливості застосування інваріантного аналізу до таких моделей, але досить коротко і обмежено. Зокрема, при побудові матриці інцидентності враховується лише наявність або відсутність дуги між вершинами (1 або 0). Тобто не врахована ні кількість міток, ні їх тип, що робить такий аналіз подібним до аналізу безпечних мереж Петрі і невиправдано спрощує модель, потенційно пропускаючи важливу інформацію.

В [7] автор пропонує так звані об'єктні мережі Петрі, мітками яких можуть бути інші мережі Петрі, які репрезентують об'єкти. Пропонуються різні способи взаємодії таких об'єктних мереж Петрі як між собою, так і з зовнішньою мережею, по які вони рухаються. Така мережа називається системною. Ця інтерпретація мереж Петрі також дозволяє проводити об'єктно-орієнтоване моделювання, але автор не піднімає питання формального аналізу таких моделей.

IV. Висновки

Отже, бачимо що поєднання ООП та мереж Петрі є перспективним напрямком, про що свідчить велика кількість наукових праць, які пропонують варіанти такого поєднання. Проте, одна з ключових переваг мереж Петрі – можливість формального аналізу моделей – зазвичай не отримує достатньої уваги в контексті об'єктно-орієнтованих інтерпретацій. Таким чином виникає потреба в адаптації формальних методів аналізу мереж Петрі, зокрема інваріантного аналізу, до об'єктно-орієнтованих мереж Петрі, що дозволило б будувати точні та детальні моделі програмних систем, які будуються за принципами ООП, і проводити якісну перевірку цих моделей на предмет наявності прихованих помилок.

Література

[1] Супруненко О.О. Комбінований підхід до імітаційного моделювання динаміки програмних систем на основі інтерпретацій мереж Петрі. KPI Science News. с. 43-53.

[2] Супруненко О.О., Онищенко Б.О., Гребенович Ю.Є. Аналіз прихованих помилок у моделях програмних систем на основі мереж Петрі. Electronic Modeling. 2022. V. 44. № 2, с. 38-50.

[3] Кузьмук В.В., Супруненко О.О. Средства описания информационных потоков в динамических моделях медицинских программно-аппаратных систем. ISJ Theoretical & Applied Science 07 (15): 11-18.

[4] Wil M.P. van der Aalst, "Learning Colored Petri Nets Using Object-Centric Event Data (OCED2CPN)," 2023 7th IEEE Congress on Information Science and Technology (CiSt), Agadir - Essaouira, Morocco, 2023, pp. 1-6

[5] Radek Kočí, Vladimír Janoušek, and František Zbořil, jr., "Object Oriented Petri Nets — Modelling Techniques Case Study," 2008 Second UKSIM European Symposium on Computer Modeling and Simulation, Liverpool, UK, 2008, pp. 165-170

[6] Yongyang Zhang, En'gao Peng, Zhenkun Luo, Lianghua Zeng, and Chun Li, "Bottleneck detection for discrete manufacturing system based on object-oriented colored petri nets and cloud simulation," ITM Web of Conferences. 45. 01015.

[7] Rüdiger Valk, "Object Petri Nets -- Using the Nets-within-Nets Paradigm," Advances in Petri Nets: Lectures on Concurrency and Petri Nets, volume 3098 of Lecture Notes in Computer Science, pages 819-848. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.

[8] H. Motameni, A. Movaghar, B. Shirazi, M. Aminzadeh and H. Samadi, "Analysis Software with an Object-Oriented Petri Net Model," World Applied Sciences Journal 3 (4): 565-576, 2008

Оцінка семантичної та часової узгодженості розподілених інформаційних ресурсів

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.036

Юрій Геряк
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
yurii.m.heriak@lpnu.ua

Андрій Берко
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
andrii.y.berko@lpnu.ua

Анотація — **Представлено комплексний підхід до оцінки семантичної та часової узгодженості розподілених інформаційних ресурсів. Описано поняття ключових метрик для вимірювання змістовної та часової відповідності даних між різними вузлами системи, запропоновано формалізовані моделі для автоматичного контролю якості інформації. Проведено аналіз основних труднощів у підтримці консистентності та окреслено перспективи розвитку методів і інструментів моніторингу для підвищення надійності сучасних розподілених систем.**

Ключові слова — семантична узгодженість, часова узгодженість, розподілені інформаційні ресурси, контроль якості даних, метрики консистентності, автоматизація, розподілені системи.

I. Вступ

Сучасна цифрова трансформація спричинила не тільки зростання обсягів даних, а й появу складних розподілених інформаційних систем, що охоплюють різні вузли, географічні регіони та середовища використання. Якість та цілісність інформації в таких системах є критично важливими для підтримки достовірності даних, коректності аналізу й ефективності процесів прийняття рішень у промисловості, науці, державному управлінні й повсякденному житті. Зокрема, навіть незначні втрати або спотворення даних під час передачі можуть призвести до помилкових висновків, втрат ресурсів або виникнення технологічних ризиків [1].

Забезпечення високого рівня консистентності розподілених інформаційних ресурсів передбачає не лише технічний, а й семантичний та просторовий контроль якості. Семантична узгодженість означає збереження змістової відповідності й уніфікації сенсу даних між незалежними компонентами системи, тоді як просторова консистентність стосується співставлення та узгодженості геопросторової або тимчасової інформації. Сучасні методи підтримки консистентності включають використання алгоритмів порівняння, класифікації та машинного навчання, що дозволяє автоматизувати процеси перевірки відповідності даних і зменшувати імовірність помилок чи дублювання інформації [2][4].

Удосконалення підходів і методів оцінки семантичної та просторової консистентності розглядається сьогодні одним з найактуальніших напрямів у сфері контролю якості даних. Ефективність рішень у цьому контексті забезпечує підвищення надійності систем, зменшення ризику критичних помилок та сприяє довірі користувачів до сучасних цифрових сервісів і багаторівневих інформаційних інфраструктур [3][4].

II. Семантична узгодженість: поняття і метрики

Семантична узгодженість у розподілених інформаційних ресурсах – це властивість даних, що забезпечує їхню змістову узгодженість та несуперечливе трактування між різними автономними вузлами системи. На відміну від синтаксичної консистентності, яка стосується структури і формату, семантична акцентує увагу саме на ідентичності змісту, контексті та значеннях інформації. У умовах значної гетерогенності розподілених середовищ виникає ризик втрат або перекручення значень даних через різні підходи до їх опису чи представлення, що особливо критично для інтеграції великих та динамічних даних у складних інформаційних системах [5].

Виявлення несуперечливості сенсу даних між вузлами передбачає застосування спеціалізованих алгоритмів аналізу схожості або відмінностей, які можуть ґрунтуватися як на лінгвістичних, так і на статистичних підходах. Серед найбільш поширених метрик семантичної схожості використовуються Jaccard similarity (порівняння множин елементів), Levenshtein distance (визначення мінімальної кількості операцій редагування між рядками) та WordNet-based similarity (обробка лексичних відносин між словами). Застосування цих підходів дозволяє автоматизувати контроль відповідності контексту та значення інформації, впроваджувати комплексні механізми перевірки та уніфікації змісту даних [5][8].

Кожна з цих метрик має власні переваги та недоліки у розподілених системах. Наприклад, коефіцієнт Жаккара найкраще працює для аналізу схожості структурованих даних (наприклад, тегів, словників або категорій), тоді як Levenshtein distance ефективно визначає рівень схожості між текстовими описами. WordNet-based підхід дозволяє оцінити семантичну близькість із врахуванням ієрархічних мовних зв’язків, що надзвичайно актуально при інтеграції багатомовних або різнорідних інформаційних масивів. На практиці доцільно поєднувати кілька алгоритмів для отримання більш комплексної оцінки консистентності [5].

Загалом, якість підтримки семантичної консистентності залежить від гнучкості обраної стратегії порівняння, здатності враховувати специфіку домену даних, рівень автоматизації засобів контролю й можливість адаптації метрик під конкретні прикладні завдання. Використання сучасних алгоритмів адаптивного зіставлення надає широкі перспективи для розвитку систем аналізу якості розподілених інформацій, підвищує надійність корпоративних, наукових і державних даних [5] [6].

III. Просторова і часова узгодженість

Просторова та часова узгодженість є критичними аспектами якості розподілених інформаційних ресурсів, які визначають точність і узгодженість даних щодо їх географічної локалізації та часових характеристик у різних вузлах системи. Геопросторова консистентність означає відповідність координат, геотегів та інших атрибутів просторових об'єктів, що знаходяться в різних фрагментах розподіленої бази, а також ідентичність просторового представлення реальних об'єктів у всіх точках інтеграції інформації. Це актуально для систем моніторингу, картографії, транспортної логістики та інших галузей, де дані можуть надходити з різних джерел і потребують гармонізації та перевірки на співставність [3][7].

Часова узгодженість стосується узгодженості часових атрибутів даних — наприклад, міток подій, версій документів чи записів транзакцій, особливо коли дані створюються, змінюються або реплікуються в різних часових зонах і різними пристроями. До її показників належать періодичність оновлення, часові затримки між змінами, латентність синхронізації реплік, а також цілісність послідовності подій. Недостатня часова консистентність спричиняє появу застарілих, дубльованих або суперечливих записів, що знижує достовірність результатів обробки інформації та створює ризики для систем реального часу [9].

Основними практичними причинами порушень просторової і часової консистентності є затримки передачі, відмінності в локальних налаштуваннях часу, неоднорідність стандартів зберігання й форматів координат, а також специфіка топології самої розподіленої системи. Наприклад, відхилення в роботі GPS-датчиків, асинхронність оновлень геопросторових шарів або некоректна обробка часових міток можуть призвести до розбіжностей між частинами бази даних, що знижує ефективність аналітики або автоматизованого управління процесами [9].

Наслідки нехтування просторовою та часовою узгодженістю проявляються у вигляді втрат аналітичної цінності даних, некоректності геопросторової візуалізації, помилок у навігаційних та логістичних системах, а також у підвищенні ймовірності інформаційних колізій при об'єднанні чи актуалізації великих масивів інформації. Відтак регулярний контроль, синхронізація та уніфікація просторових і часових показників є невід'ємною частиною якісного функціонування сучасних розподілених інформаційних ресурсів. Просторова й часова консистентність у розподілених інформаційних системах визначає узгодженість географічних координат, просторових характеристик і часових параметрів даних у різних вузлах системи. Геопросторова узгодженість відповідає за однаковість інтерпретації і відображення просторових об’єктів (наприклад, місцезнаходження, межі територій, маршрути), а також правильне співвіднесення таких даних між різними фрагментами й джерелами інформації. Це набуває особливої ваги для екосистем моніторингу, геоінформаційних платформ, транспортної логістики й цифрової картографії, де навіть незначні невідповідності можуть призводити до критичних помилок [5][3][10].

Часова узгодженість означає гармонізацію та точність часових міток, атрибутів оновлення й синхронізації інформації у всіх вузлах системи або середовищах даних. Серед ключових показників — латентність доставки даних, актуальність відомостей, рівень синхронізації між репліками та коректність порядку подій. У зонах реального часу, аналітичних підсистемах і транзакційних службах недостатня часова узгодженість часто спричиняє появу застарілих, недостовірних, дубльованих чи суперечливих записів, що безпосередньо впливає на ефективність управління процесами [5][10].

До головних джерел розбіжностей у просторових і часових даних відносять локальні відмінності в стандартах: формати й точність координат, часові пояси, асинхронність або затримки у синхронізації, різні режими обробки подій між вузлами, а також збої у роботі сенсорів чи GPS-модулів. Навіть незначне породження відхилень у геопросторових або часових характеристиках може істотно знизити надійність аналітики, ускладнити візуалізацію та порушити автоматизоване управління територіальними чи логістичними системами [3][10].

Наслідки нехтування просторовою та часовою консистентністю проявляються у вигляді зміщення контексту даних, втрати аналітичної цінності, некоректної інтеграції й візуалізації, а також збільшення кількості інформаційних колізій під час оновлення або об’єднання масивів у розподілених сховищах і сервісах. Регулярний аудит, стандартизація форматів і автоматизована синхронізація — ключові інструменти для уникнення цих проблем у сучасних цифрових платформах [5][11].

IV. Методи й інструменти оцінки

Оцінка якості розподілених інформаційних ресурсів здійснюється за допомогою різних методів — від повністю автоматизованих до ручних, що залежать від специфіки даних та вимог системи. Автоматизовані підходи передбачають інтеграцію спеціалізованих метрик і алгоритмів у процеси збору, моніторингу та порівняння даних, а ручна експертиза надає можливість тонкого налаштування та додаткової перевірки результатів в критичних секторах. В сучасних комплексних системах часто застосовують комбіновану стратегію для підвищення точності оцінки [10].

Для оцінки семантичної узгодженості між даними пропонується використовувати формулу подібності:

$$Sim\left(v_i^{source}, v_i^{target}\right) = 1 - D\left(v_i^{source}, v_i^{target}\right), \quad (1)$$

де $D\left(v_i^{source}, v_i^{target}\right)$ визначено як відстань між відповідними значеннями (наприклад, за методами Jaccard, Levenshtein чи WordNet similarity). Згідно з запропонованим підходом, дані вважаються семантично узгодженими у разі, якщо для більшості пар Sim перевищує поріг 0.8, а середнє значення семантичної консистентності розраховується так:

$$SC = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} Sim\left(v_i^{source}, v_i^{target}\right), \quad (2)$$

де N — кількість пар даних для порівняння.

Також семантичну узгодженість можна формально визначити через контекстуальну семантичну відстань (CSD) між множинами термінів, де

$$CSD\left(D_i, D_j\right) = \frac{\left|\Omega_i \cap \Omega_j\right|}{\min\left(\left|\Omega_i\right|, \left|\Omega_j\right|\right)} \quad (3)$$

Де, Ω_i, Ω_j — множини семантичних ознак/термінів у відповідних наборах даних. Значення CSD≥0,8 свідчить про високу семантичну узгодженість [12].

Для вимірювання просторової узгодженості рекомендується аналізувати співвідношення координат або просторових атрибутів на основі відповідних просторових метрик, що забезпечує виявлення відхилень у розташуванні об’єктів. Щодо часової консистентності, запропоновано використовувати показник затримки реплікації:

$$TC = 1 - \frac{T}{T^{max}} \quad (4)$$

де T — реальна затримка, а T^{max} — припустиме максимальне значення. Значення, близькі до 1, свідчать про високу часову узгодженість між вузлами розподіленої системи.

Цей підхід доповнюється концепціями часово-просторової узгодженості, які базуються на моделях timed causal consistency та timed linearizability, що формалізують узгодженість операцій в межах часової затримки Δ.

Формула для timed causal consistency має вигляд:

$$TIMEDCAUSALITY(F, \Delta) \equiv CAUSALITY(F) \wedge TIMEDVISIBILITY(\Delta) \quad (5)$$

Де:

- F — функція або послідовність операцій системи;
- $CAUSALITY(F)$ - збереження каузального порядку операцій: якщо операція A впливає на операцію B, всі вузли бачитимуть A перед B, що виконує логічний порядок залежностей;
- $TIMEDVISIBILITY(\Delta)$ — обмеження в часі, яке гарантує, що будь-який результат операції стане доступний усім вузлам системи не пізніше ніж через інтервал Δ від часу її виконання.

Формула для timed linearizability має вигляд:

$$TIMEDLINEARIZABILITY(F, \Delta) \equiv SINGLEORDER \wedge TIMEDVISIBILITY(\Delta) \wedge RVAL(F) \quad (6)$$

де: $SINGLEORDER$ вказує, що операції сприймаються у системі в єдиному послідовному порядку, логічно узгодженому для всіх користувачів і процесів (лінійна зупинка чи linearizability); $TIMEDVISIBILITY(\Delta)$ - те саме часово-затримкове обмеження видимості оновлень як і вище; $RVAL(F)$ - вимога, що значення, які повертаються операціями читання, відповідають останньому лінійно узгодженому оновленню.

Ці моделі спільно гарантують:

- збереження порядку операцій відповідно до їх логічних або причинно-наслідкових зв’язків,
- забезпечення того, що всі зміни у системі будуть помічені іншими вузлами не пізніше ніж через Δ часу,
- підтримку узгодженого та свіжого стану даних для користувачів у розподіленій системі.

Іншими словами, застосування цих моделей дозволяє врахувати не лише логіку взаємозв’язків операцій, а й реальні часові характеристики системи, що критично для забезпечення високої якості та надійності розподіленого інформаційного процесу [13].

Щоб визначити агрегований індекс якості для узгодженості даних, у роботі пропонується формула:

$$C_{agg} = w_1 C_{col} + w_2 C_{schema} + w_3 C_{pop} \quad (7)$$

де C_{col}, C_{schema}, C_{pop} — це часткові показники для повноти колонок, схеми й популяції, а $w_1 + w_2 + w_3 = 1$; ваги добираються з урахуванням специфіки прикладного сценарію.

Практична реалізація запропонованих методів передбачає використання сучасних інструментів збору й обробки метрик: Prometheus, Zabbix, Power BI, Tableau, а також автоматизованих REST API для

інтеграції з хмарними й потоковими платформами. Це дозволяє оперативно отримувати оцінки якості даних у великих розподілених системах, забезпечуючи гнучке реагування на потенційні загрози консистентності та підвищення надійності інформаційних процесів [10].

V. Складнощі та перспективи впровадження

Оцінка узгодженості розподілених інформаційних ресурсів стикається з низкою суттєвих складнощів, що зумовлені специфікою розподілених систем. По-перше, відсутність централізованого контролю створює виклики у синхронізації даних між численними незалежними вузлами, де затримки, мережеві відмови та асинхронні оновлення можуть призводити до несуперечливих станів баз даних. По-друге, неоднорідність структур і форматів даних, різні політики доступу і обробки інформації ускладнюють стандартизацію показників якості, що ускладнює побудову універсальних моделей та алгоритмів оцінки [10]

Іншою проблемою є відсутність єдиних норм та стандартів для визначення і вимірювання якості даних у розподілених середовищах, через що організації часто залежать від власного досвіду та встановлених практик. Це породжує ризики появи непослідовних або навіть суперечливих оцінок якості, що може призвести до некоректного використання інформації й зниження довіри до системи. Крім того, значна частина таких вимірювань носить багатовимірний, суб'єктивний характер і потребує балансу між точністю автоматизованих процесів та експертним аналізом [10].

Перспективи розвитку методів оцінки якості розподілених даних пов'язані з удосконаленням алгоритмів машинного навчання, штучного інтелекту і семантичної аналітики, які здатні покращити розуміння контексту та сенсу інформації, усувати помилки та забезпечувати адаптивність систем оцінки до різних доменів і сценаріїв. Майбутні напрями досліджень орієнтовані на посилення інтеграції різних аспектів якості, в тому числі точності, повноти, узгодженості та актуальності, у комплексні моделі з урахуванням специфіки розподілених систем і їх масштабованості [2].

Важливими також є розробка стандартизованих фреймворків та протоколів для контролю якості, які зможуть забезпечити уніфікований підхід до оцінки й прогнозування стану даних. Впровадження механізмів відновлення консистентності та самокорекції даних, а також автоматизованих систем моніторингу допоможуть мінімізувати ризики деградації інформаційних ресурсів у реальному часі. Ці тенденції відкривають широку перспективу для наукових і практичних розробок у сфері систем контролю якості розподілених інформаційних ресурсів [10].

Література

[1] V. S. Balatska, Enhancing the Effectiveness of Personal Data Protection in the Context of Digital Informatization of State Registers in Ukraine, PhD dissertation in specialty 125 "Cybersecurity," Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2025. [Online]. Available: https://lpnu.ua/sites/default/files/2025/radaphd/32586/disertaciyabalatskavaleriiasergiivna.pdf

[2] Ye. R. Kovylin, Model of Answers Generation in Search Engines Based on an Unstructured Knowledge Base, PhD dissertation in specialty 01.05.02 – Mathematical Modeling and Computational Methods, Oles Honchar Dnipro National University and National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2020. [Online]. Available: https://nmetau.edu.ua/file/diss_kovilin.pdf

[3] Ye. A. Borovskova, "Determining Optimal Caching Strategies for Improving the Performance of Server Applications on NestJS," Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences, vol. 35 (74), no. 6, 2024, pp. 18–26. DOI: 10.32782/2664-6468/2024.6-2.04.

[4] O. Ye. Arkusha, "Comparison of Hashing Methods in Supporting Consistency of Distributed Databases," in Advanced Systems and Computing, vol. 40, 2022. DOI: 10.20535/1560-8956.40.2022.261646.

[5] M.K. Aguilera, D.B. Terry, "The Many Faces of Consistency," IEEE Database Engineering Bulletin, vol. 39, 2016, pp. 3–13. [Online]. Available: http://sites.computer.org/debull/A16mar/p3.pdf

[6] P. V. Buslov, Models and Methods for the Differentiation of Consolidated Information Data for Decision Support Systems, PhD dissertation in specialty 05.13.06 – Information Technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Cherkasy State Technological University, 2021. [Online]. Available: https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/2067/12/dis_%D0%91%D1%83%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2%20%D0%9F.%D0%92..pdf

[7] V. Duchenchuk and V. Boublik, Consistency Models for Distributed Virtual Reality Systems. NaUKMA Research Papers. Computer Science. 3, 2020, pp. 7-11. DOI: 10.18523/2617-3808.2020.3.7-11.

[8] A. S. Tanenbaum, and M. V. Steen, Distributed systems: Principles and paradigms. Createspace Independent Publishing Platform, 2016.

[9] G. Zholtkevych, Mathematical Modeling of Data Replication Processes in Distributed Datastores [Electronic resource]: qualification scientific work for the degree of Candidate of Science in specialty 01.05.02 – Mathematical modeling and computational methods (Technical Sciences) / Galina Grigoriyivna Zholtkevych; supervisor Kirilo Markovych Rukkas. – Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University; A. M. Pidgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine, 2021. – 116 p. [Online]. Available: https://ipmach.kharkov.ua/wp-content/uploads/2021/03/%D0%94%D1%96%D1%81%D0%B5%D1%80-Copy.pdf

[10] Y. Heriak and A. Berko, "The System of Data Quality Assessment Criteria in Distributed Information Systems," Scientific Journal of Lviv Polytechnic, vol. 16, 2024. DOI: 10.23939/sisn2024.16.191.

[11] A. M. Hlybovets, T. A. Chernova, and M. M. Hlybovets, "Development of a Methodology for Transaction Implementation in Distributed Systems with Microservice Architecture," in Problemy Programuvannya, no. 1, 2024, pp. 64–72. DOI: 10.15407/pp2024.01.64

[12] A. Berko, "Methods and Means of Semantic Data Integration," Scientific Journal, Lviv Polytechnic National University, 2009. [Online]. Available: https://vlp.com.ua/files/29_10.pdf

[13] P. Viotti and M. Vukolić, "Consistency in Non-Transactional Distributed Storage Systems," arXiv preprint arXiv:1512.00168, 2015. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1512.00168

Хмарні технології та мобільні додатки в інтелектуальному управлінні рибними господарствами

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.037

Сергій Дацишин
Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна
s.b.datsyshyn@nuwm.edu.ua

Ольга Мічута
Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна
o.r.michuta@nuwm.edu.ua

У статті розглянуто застосування хмарних технологій та мобільних додатків для цифрової трансформації аквакультури. Запропоновано концепцію експертної системи управління рибними господарствами, реалізованої у форматі SaaS-платформи з інтеграцією мобільного застосунку для фермерів. Основними функціональними можливостями системи є автоматичний збір даних з IoT-пристроїв, аналіз параметрів водного середовища, прогнозування врожайності та норм годівлі на основі алгоритмів машинного навчання, а також формування рекомендацій і попереджень у режимі реального часу. Очікується, що впровадження такого рішення сприятиме оптимізації витрат, підвищенню продуктивності та біобезпеки, а також інтеграції українських рибних господарств до міжнародних практик Smart Aquaculture. [1]

Ключові слова: аквакультура; хмарні технології; мобільний додаток; експертна система; SaaS; IoT; цифрове рибництво

У сучасних умовах аквакультура є однією з найбільш динамічних галузей харчового виробництва, що забезпечує зростаючий попит на рибу та морепродукти. Проте її розвиток супроводжується низкою викликів: зміни клімату, погіршення якості води, підвищення ризиків виникнення хвороб риби, зростання вартості кормів та енергоносіїв. Для забезпечення стабільного виробництва та підвищення конкурентоспроможності необхідне впровадження інноваційних інформаційних технологій, зокрема хмарних сервісів та мобільних додатків, здатних інтегрувати дані з різних джерел і підтримувати інтелектуальне управління виробничими процесами.[3]

Запропоноване рішення базується на розробці експертної системи управління рибними господарствами, що реалізується у форматі SaaS-платформи (Software as a Service) та мобільного застосунку для фермерів. Хмарна інфраструктура дозволяє забезпечити централізовану обробку великих масивів даних та аналітику у реальному часі, а мобільний додаток надає зручний доступ до рекомендацій та попереджень безпосередньо на виробництві.[2]

Ключові функціональні можливості системи включають: інтеграцію з IoT-пристроями: автоматичний збір показників якості води (температура, pH, розчинений кисень, аміак, рівень води) та технічних параметрів (енергоспоживання, робота насосів, аераторів).

Експертна система правил виходить з автоматичного генерування попереджень та рекомендацій за відхилень параметрів від оптимальних значень (наприклад, при падінні концентрації кисню нижче 3,5 мг/л формується рекомендація щодо включення аерації).

Прогнозна аналітика на основі ML передбачає використання алгоритмів машинного навчання для оцінки майбутньої врожайності, прогнозування норм годівлі та виявлення аномалій у поведінці риби чи параметрах водного середовища.[5]

Мобільний застосунок для фермерів використовуватиме push-сповіщення, інтерактивний дашборд, календар годівлі, журнал подій, можливість ручного введення даних і доступ до історичних показників.

Хмарний SaaS-сервіс для адміністраторів та аналітиків буде здійснювати централізоване управління даними, аудит користувацьких дій, формування звітів (CSV, PDF), можливість масштабування для кількох господарств та інтеграція з ERP-системами.

Очікувані переваги впровадження: оптимізація витрат на корми та електроенергію шляхом точного розрахунку норм годівлі, зниження ризиків масової загибелі риби завдяки оперативному реагуванню на критичні зміни середовища, підвищення продуктивності та біобезпеки у ставкових і басейнових господарствах, формування бази даних для довгострокових прогнозів і стратегічного планування виробництва, можливість масштабування від малих сімейних ферм до великих промислових комплексів, інтеграція з європейськими практиками «Smart Aquaculture», що

відкриває перспективи міжнародної співпраці та експорту українських цифрових рішень.

Таким чином, хмарні технології та мобільні додатки виступають ключовим інструментом цифрової трансформації аквакультури. Розробка та впровадження подібних експертних систем сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності українських рибних господарств, їхньому переходу до більш сталого та ресурсоефективного виробництва.[4]

Література.

[1] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in Action. Rome: FAO, 2024. DOI: https://doi.org/10.4060/cc9350en

[2] European Commission. Smart and Sustainable Aquaculture: EU Digital Agenda Report. Brussels: EC, 2023.

[3] Lee, C., & Hu, W. Cloud-Based IoT Systems for Aquaculture Management. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198, 107028.

[4] Zhu, X., Zhang, Y., & Wang, L. Mobile Applications for Precision Aquaculture: A Review. Aquacultural Engineering, 2021, 94, 102189.

[5] Nguyen, H. T., Vo, T. Q., & Tran, D. Cloud Computing and AI in Aquaculture: Toward Smart Farming Solutions. Journal of Aquaculture Research & Development, 2020, 11(5), 1–7.10.48077/scihor8.2024.158.

Захист даних в автоматизованих системах управління земельними ресурсами органів місцевого самоврядування

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.038

Василь Дрозд
Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна
v.v.drozd@nuwm.edu.ua

Ольга Мічута
Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна
o.r.michuta@nuwm.edu.ua

У статті розглядаються проблеми захисту даних в автоматизованих системах управління земельними ресурсами органів місцевого самоврядування в умовах воєнного стану в Україні. Акцент зроблено на необхідності інтеграції сучасних міжнародних стандартів кіберзахисту, зокрема NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0, у практику місцевих рад для підвищення прозорості та безпеки кадастрових даних. Автор пропонує створення прототипу плагіна для QGIS, який реалізує принципи CSF: ідентифікація активів, захист, моніторинг, реагування та відновлення. Впровадження такого інструменту дозволить знизити ризики маніпуляцій із земельними ресурсами, забезпечити відповідність міжнародним стандартам управління ризиками та підвищити довіру громадян до цифрових сервісів органів влади. [1]

Ключові слова: земельні ресурси; автоматизовані системи; кіберзахист; NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0; QGIS; місцеве самоврядування; кадастр; воєнний стан

Автоматизовані системи управління земельними ресурсами місцевого самоврядування це геоінформаційні системи, які у своєму складі мають бази даних, що містять певну інформацію з різноманітних реєстрів, зокрема персональні дані. В теперішній час, особливо в умовах воєнного стану, захист інформації від крадіжок, хакерських атак набуває обов'язкового значення. Законодавча база, щодо захисту інформації ґрунтується на Законах України "Про інформацію", "Про доступ до публічної інформації", "Про державну таємницю", "Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах", "Про електронні комунікації", "Про основні засади забезпечення кібербезпеки України", Положенні про технічний захист інформації в Україні, затвердженому Указом Президента України від 27 вересня 1999 року № 1229, Положенні про організаційно-технічну модель кіберзахисту, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2021 року № 1426, Правила забезпечення захисту інформації в інформаційних, електронних комунікаційних та інформаційно-комунікаційних системах, затверджені постановою Кабінет Міністрів України від 29 березня 2006 року № 373 (останні зміни 28 березня 2025 року). Адміністрацією Держспецзв'язку видано наказ від 30 січня 2025 року № 54 «Про затвердження Базових заходів з кіберзахисту та Методичних рекомендацій щодо здійснення базових заходів з кіберзахисту». Методичні рекомендації щодо здійснення базових заходів з кіберзахисту розроблено з урахуванням документа NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2, виданого у 2024 році Національним інститутом стандартів та технології Сполучених Штатів Америки (National Institute of Standards and Technology). [1]

Фреймворк NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0 надає універсальний підхід для оцінки та зниження кіберризиків у сфері автоматизації земельних ресурсів. У контексті місцевого самоврядування впровадження CSF дозволяє місцевим радам гарантувати прозорість та достовірність кадастрових даних, знизити ризики махінацій із землею, захистити дані від кібератак та внутрішніх загроз, підвищити довіру громадян до цифрових сервісів. Створення прототипу плагіна для QGIS на основі NIST CSF 2.0 автоматизує моніторинг, захист та аудит дій користувачів у системі. [2; 3; 4]

Розглянемо основні модулі плагіна.

Модуль ідентифікації активів (Identify): автоматично створює інвентаризацію шарів (земельні ділянки, власники, кадастрові номери), визначає критичні дані (наприклад, права власності чи земельні межі).

Модуль контролю доступу (Protect): інтеграція з базою користувачів (LDAP / Active Directory), розмежування доступу (адміністратор, землевпорядник, перегляд для громадян), двофакторна автентифікація при вході.

Модуль моніторингу (Detect): відстеження змін у кадастровій базі в реальному часі, виявлення аномалій (наприклад, якщо площа ділянки зменшена/збільшена >10% без пояснення), журнал змін із можливістю відкату.

Модуль реагування (Respond): автоматичне сповіщення адміністратора про підозрілі зміни, генерація звіту про інцидент, тимчасове блокування підозрілих користувачів.

Модуль відновлення (Recover): інтеграція з системою резервного копіювання, автоматичне відновлення останньої коректної версії шару, перевірка цілісності резервних даних.

Інтерфейс користувача можна представити панель «CyberSecurity Dashboard» у QGIS з 3 вкладками:

Assets & Risks – інвентаризація шарів і ризиків.

Events Monitor – журнал подій і виявлені аномалії.

Recovery – управління резервними копіями та відновленням.

Очікуваний ефект від застосування плагіна полягає у зниженні ризику маніпуляцій із кадастровими даними, підвищенню прозорості діяльності земельного відділу, відповідність міжнародним стандартам управління ризиками, можливість масштабування плагіна для використання в усіх громадах України. [1; 5]

Література.

[1] National Institute of Standards and Technology. *The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0*. NIST Cybersecurity White Paper (CSWP 29). Gaithersburg, MD: NIST, 2024. DOI: https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.29.

[2] National Institute of Standards and Technology. *Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations (NIST SP 800-53 Rev. 5)*. Gaithersburg, MD: NIST, 2020.

[3] Zhiltsov, S., Korytnyi, M., & Malakhov, O. *GIS Technologies for Land Use and Cadastral Systems*. Journal of Geodesy and Cartography, 2021, 45(3), 25–33.

[4] Goodchild, M. F. *GIS and Public Policy: Using Geographic Information Systems for Government Decision-Making*. Annual Review of Public Policy, 2020, 12, 221–240.

[5] European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). *Good Practices for Security of IoT and Smart Infrastructure*. ENISA Report, 2021.

MCIT Modeling, control & information technologies

Інтеграція PySpark Streaming з AWS EMR та Step Functions для обробки великих даних в реальному часі

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.039

Богдан Красько
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
b.v.krasko@nuwm.edu.ua

Петро Грицюк
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
p.m.hrytsiuk@nuwm.edu.ua

Анотація—**У статті розглядається інтеграція PySpark Streaming з AWS EMR та Step Functions для обробки великих даних в реальному часі. Описано рішення двох ключових проблем, що виникають при запуску та оновленні потокових обробок даних: забезпечення безперервної роботи стрім-джоб без downtime і автоматичне оновлення версій PySpark Streaming jobs. Для вирішення цих завдань пропонується використання AWS Step Functions для оркестрації запуску і зупинки джоб, а також S3 Bucket для визначення лідера, що гарантує запуск тільки однієї активної джоби. Окрім того, у статті розглянуто механізм автоматичного перезапуску джоб у разі помилок та створення подій для оновлення версій завдань. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервну і масштабовану обробку потокових даних, мінімізуючи ризики downtime та забезпечуючи автоматизацію процесів на всіх етапах.**

Ключові слова; AWS, PySpark, BigData

I. ВСТУП

Зростання обсягів даних та швидкості їх генерації в сучасних інформаційних системах зумовлює потребу у переході від пакетної до потокової обробки. Традиційні підходи, що передбачають накопичення даних з подальшою періодичною обробкою, стають недостатніми в умовах, коли критично важливо приймати рішення на основі актуальної інформації. Приклади таких сценаріїв включають фінансові транзакції, моніторинг кібербезпеки, IoT-пристрої, аналіз поведінки користувачів у режимі реального часу та системи рекомендацій.

Apache Spark, а саме його модуль Structured Streaming, є однією з найпопулярніших платформ для обробки потокових даних завдяки високій масштабованості, здатності інтегруватися з різними джерелами даних та підтримці розподіленої обробки у кластерах. Використання Spark у хмарних середовищах, таких як Amazon Web Services (AWS), дозволяє досягати гнучкості в управлінні обчислювальними ресурсами, спрощує розгортання інфраструктури та знижує витрати на підтримку.

Зокрема, Amazon EMR on EKS надає можливість запускати Spark-джоби у середовищі Kubernetes, що забезпечує еластичне масштабування та уніфіковане управління контейнерними робочими навантаженнями. Проте постає низка викликів, пов'язаних з безперервною роботою PySpark Streaming job: обмеження тривалості виконання завдань у кластері, потреба в автоматичному перезапуску після збоїв, а також необхідність керованого оновлення версій джоб без зупинки потоків даних.

Для вирішення цих проблем у даній роботі запропоновано інтеграцію PySpark Streaming з сервісами AWS Step Functions та Amazon EventBridge, які виконують роль оркестраторів і механізмів реагування на події, а також використання Amazon S3 як сховища метаданих для синхронізації виконання. Такий підхід забезпечує:

- постійну доступність стрімінгових джоб;
- автоматичне самовідновлення у разі виникнення помилок;
- безперервність бізнес-процесів навіть під час оновлення версій Spark-джоб.

Таким чином, інтеграція PySpark Streaming з AWS-сервісами створює потужну інфраструктуру для обробки великих даних у реальному часі, яка поєднує у собі надійність, масштабованість та керованість.

II. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Організація потокової обробки великих даних у сучасних інформаційних системах пов'язана з низкою суттєвих викликів. З одного боку, бізнес прагне до зменшення затримки між появою події та її аналізом, щоб реагувати на зміни середовища у реальному часі. З іншого боку, інфраструктура, у якій розгортаються системи потокової обробки, накладає певні обмеження на тривалість виконання завдань, доступність ресурсів та узгодженість результатів. Особливу увагу слід звернути на архітектури, що базуються на Apache Spark, адже цей інструмент завдяки модулю Structured Streaming

є одним із провідних рішень для аналітики потокових даних [1].

Разом із тим, запуск Spark-джоб у середовищі Amazon EMR on EKS створює певні складності. Оскільки кожна джоба виконується у контейнеризованому середовищі Kubernetes, вона підпорядковується політикам управління життєвим циклом контейнерів і не може працювати безкінечно довго. Це суперечить самій природі потокових обчислень, які розраховані на безперервне виконання. У випадку, коли джоба завершується через перевищення часу життя, існує ризик втрати даних або виникнення дублювання під час спроби її перезапустити. Вирішенням цієї проблеми стає інтеграція декількох сервісів AWS, які в комплексі формують механізм безперервної роботи PySpark Streaming у режимі «always-on».

Ключову роль у цій архітектурі відіграє сервіс AWS Step Functions, який виконує функцію оркестратора. Завдяки йому кожна нова Spark-джоба може запускатися з наперед визначеною періодичністю, наприклад кожні тридцять хвилин. Таким чином обмеження на тривалість виконання окремої джоби нівелюється регулярними перезапусками. Проте цей підхід породжує іншу проблему: щоразу запускається новий процес, і якщо не реалізувати механізм контролю, у системі може одночасно працювати кілька стрімінгових джоб. Це спричинить дублювання обробки подій та помилки у бізнес-логіці.

Щоб уникнути цього, застосовується механізм координації на базі сховища Amazon S3. У спеціально відведеному бакеті створюється lock-файл, який виконує роль «маяка» для визначення активного процесу. Коли нова джоба стартує, вона намагається оновити lock-файл. Якщо це їй вдається, вона отримує статус лідера та продовжує виконання. Якщо ж lock-файл уже зайнятий, процес завершується, не завдаючи шкоди системі. Попередні джоби, які втрачають право лідера, перевіряють lock-файл і зупиняють свою роботу. У результаті, незалежно від кількості запущених процесів, обробку подій завжди здійснює лише один активний стрімінговий процес.

Надійність системи підвищується завдяки інтеграції з сервісом Amazon EventBridge. Потокові системи завжди залишаються вразливими до збоїв – це можуть бути помилки у коді, вичерпання ресурсів кластера або зовнішні чинники. У традиційних архітектурах такі збої призводили б до зупинки системи на невизначений час. Натомість EventBridge відстежує події завершення джоб і у разі виявлення помилки автоматично ініціює новий запуск Step Functions. Таким чином формується механізм самовідновлення, який дозволяє системі продовжувати роботу навіть у випадку критичних збоїв. Це особливо актуально для доменів, де будь-яка затримка в обробці подій може мати суттєві негативні наслідки, наприклад, у фінансових транзакціях чи системах виявлення кіберзагроз [2].

Окремим важливим аспектом є оновлення версій стрімінгових джоб. У потокових системах практично неможливо допустити «простоїв» під час переходу на нову версію, оскільки це призведе до втрати даних або затримки у реагуванні. У запропонованій архітектурі ця задача вирішується за допомогою подієво-орієнтованого підходу. При публікації нової версії джоби, наприклад, у вигляді JAR-файлу в Amazon S3 чи нового контейнера в Amazon ECR, генерується подія, яку обробляє EventBridge. Далі EventBridge ініціює запуск Step Functions, які створюють новий процес із оновленим кодом. Як тільки нова джоба успішно стартує, вона оновлює lock-файл у S3 та отримує право лідера. Стара версія, втративши це право, завершується. Завдяки цьому процес оновлення відбувається безшовно: користувачі не помічають жодних переривань, а система залишається узгодженою.

Таким чином, архітектура, що поєднує PySpark Streaming з Amazon EMR on EKS, Step Functions, EventBridge та S3, забезпечує високу стійкість до збоїв, безперервність виконання та керованість. Вона дозволяє ефективно працювати з великими обсягами даних у режимі реального часу, гарантуючи як точність результатів, так і оперативність реагування. Подібні архітектурні рішення уже знаходять широке застосування у промисловості, фінансах та сфері цифрових сервісів, а їх подальший розвиток відкриває перспективи для створення ще більш масштабованих та інтелектуальних систем аналітики потокових даних [3].

III. ВИСНОВКИ

Інтеграція PySpark Streaming з Amazon EMR on EKS, Step Functions, EventBridge та S3 забезпечує надійну та масштабовану архітектуру для обробки даних у реальному часі. Такий підхід гарантує безперервність роботи, автоматичне відновлення після збоїв і стабільність результатів, що робить його ефективним рішенням для роботи з великими потоками даних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Zaharia, M., Das, T., Li, H., Hunter, T., Shenker, S., & Stoica, I. (2016). Discretized streams: Fault-tolerant streaming computation at scale. Proceedings of the 26th Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '13), 423–438. https://doi.org/10.1145/2517349.252273

[2] Amazon Web Services. (2022). Build Modern Data Streaming Architectures on AWS. AWS Whitepaper. https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/build-modern-data-streaming-analytics-architectures/build-modern-data-streaming-analytics-architectures.html

[3] Karau, H., Konwinski, A., Wendell, P., & Zaharia, M. (2015). Learning Spark: Lightning-fast big data analysis. O'Reilly Media.

Інформаційна система ідентифікації домішкових компонентів важких металів у рідких середовищах

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.040

Андрій Сафоник
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Сергій Полюхович
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
s.o.polyukhovych@nuwm.edu.ua

Юрій Ковальчук
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
yu.t.kovalchuk@nuwm.edu.ua

Анотація—**У роботі представлено концепцію та результати розробки інформаційно-вимірювальної системи для ідентифікації домішкових компонентів, зокрема важких металів, у водних середовищах. Запропонована система реалізує принцип автоматизованого контролю концентрацій забруднювальних речовин із використанням оптоелектронних сенсорів і мікропроцесорного блока обробки сигналів. Наведено структурну схему системи, описано алгоритми реєстрації та цифрової обробки оптичних сигналів. Проведено експериментальні дослідження з використанням синтезованих сорбентів на основі кремнезему, модифікованого реагентами, що підвищують селективність визначення іонів Fe(II), Fe(III) та I_2. Отримані результати підтверджують ефективність застосування розробленої системи для моніторингу якості води та створюють передумови для її подальшої автоматизації та впровадження у польових вимірювальних комплексах.**

Ключові слова — інформаційно-вимірювальна система; важкі метали; водне середовище; сорбційний метод; спектрофотометрія; оптичні сенсори; мікроконтролер STM32; аналітичний сигнал; калібрування; екологічний моніторинг.

I. Вступ

Моніторинг вмісту важких металів у водному середовищі є важливою складовою екологічного контролю, оскільки ці елементи, навіть у незначних концентраціях, можуть чинити токсичний вплив на живі організми та порушувати природний баланс екосистем. Необхідність отримання достовірних і оперативних даних щодо концентрацій домішкових компонентів зумовлює потребу у вдосконаленні аналітичних методів контролю. Одним із сучасних і високочутливих методів визначення важких металів у рідких середовищах є твердофазна спектрофотометрія, яка базується на адсорбції аналіту на твердій фазі з подальшим оптичним вимірюванням. Застосування цього методу дає змогу підвищити точність аналізу, зменшити вплив сторонніх факторів і скоротити тривалість пробопідготовки [6, 7].

З метою підвищення ефективності моніторингу та автоматизації оброблення результатів досліджень розроблено інформаційну систему ідентифікації домішкових компонент у рідких середовищах. Вона забезпечує збереження, систематизацію та візуалізацію експериментальних даних, а також сприяє підвищенню оперативності прийняття рішень у сфері екологічного контролю. Поєднання твердофазної спектрофотометрії з інформаційними технологіями створює основу для формування ефективної системи моніторингу стану водних об'єктів і своєчасного виявлення небезпечних забруднень.

II. Постановка задачі

Основною метою даної роботи є розроблення та експериментальна перевірка інформаційно-вимірювальної системи для ідентифікації домішкових компонентів важких металів у водних середовищах шляхом поєднання сорбційного концентрування з оптичним детектуванням [1, 2].

Об'єктом дослідження є іони важких металів Fe^{2+}, Fe^{3+} та I_2, адсорбовані на поверхні кремнезему, модифікованого різними реагентами. Вибір саме цих елементів обумовлений їхньою поширеністю у промислових стічних водах та високою токсичністю навіть при низьких концентраціях. Для підвищення селективності та чутливості аналізу використано сорбційний підхід, що передбачає попереднє концентрування металів на поверхні функціоналізованого сорбенту типу SiO_2–полігексометиленгуанідин (ПГМГ)-реагент. Синтез сорбенту здійснювався у кілька етапів: активація поверхні кремнезему, нанесення реагенту та стабілізація отриманого покриття [3].

Ідентифікація та кількісне визначення металів проводились за допомогою твердофазної спектрофотометрії. Суть методу полягає у вимірюванні коефіцієнта відбиття світлового потоку від поверхні сорбенту після утворення кольорового комплексного з'єднання між іоном металу та специфічним реагентом. Наприклад, взаємодія іонів Fe^{2+} з батофенантроліном призводить до утворення інтенсивно забарвленого рожевого комплексу, тоді як Fe^{3+} у присутності нітрозо-R-солі дає оранжеве забарвлення, а I_2 – жовто-зелене. Інтенсивність кольору прямо пропорційна концентрації аналіту на поверхні сорбенту, що дозволяє використовувати цей показник як аналітичний сигнал [4, 5].

Для автоматизації процесу вимірювання створено структурну схему (рис.2), до складу якої входять джерело випромінювання (світлодіоди FYL3014 із довжинами хвиль 470–660 нм), фотоприймальний модуль на фотодіоді SFH229, підсилювач сигналу на операційному підсилювачі AD8606, 16-розрядний аналогово-цифровий перетворювач ADS1115 та мікроконтролер серії STM32F0. Система працює у циклічному режимі: світлодіод періодично вмикається і вимикається, що дозволяє мікроконтролеру визначати різницю між сигналом при активному освітленні та фоновим рівнем, компенсуючи вплив зовнішнього освітлення програмно.

Отримані значення оптичного сигналу передаються через інтерфейс USB-UART (на базі CP2102) до комп'ютера, де проводиться їхня обробка, побудова калібрувальних графіків і розрахунок концентрацій. Таким чином, постає завдання створення єдиної інформаційно-вимірювальної системи, що об'єднує апаратну частину (сенсорний модуль, електроніку, мікропроцесор) та програмну (цифрову фільтрацію, візуалізацію, статистичну обробку даних).

Конструктивно світлодіод і фотодіод виконані в однаковому корпусі з прозорою лінзою, і мають діаметр 3 мм. Оптична схема зображена рисунку 1.

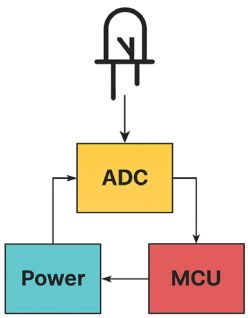


Рис.1. Оптична схема приладу

Два джерела випромінювання (світлодіоди) під кутом освітлюють поверхню зразка. В зоні перетину світлових потоків формується робоча область відбиття, сигнал від якої надходить до фотодіода для подальшого аналізу.

III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Для реалізації поставленої мети була створена експериментальна установка, яка поєднує елементи сорбційної підготовки проб та оптоелектронного аналізу відбитого світлового потоку. Установка реалізує замкнутий цикл вимірювання, що охоплює етапи сорбції, утворення кольорового комплексу, реєстрацію аналітичного сигналу, його цифрову обробку та передачу результатів до персонального комп'ютера.

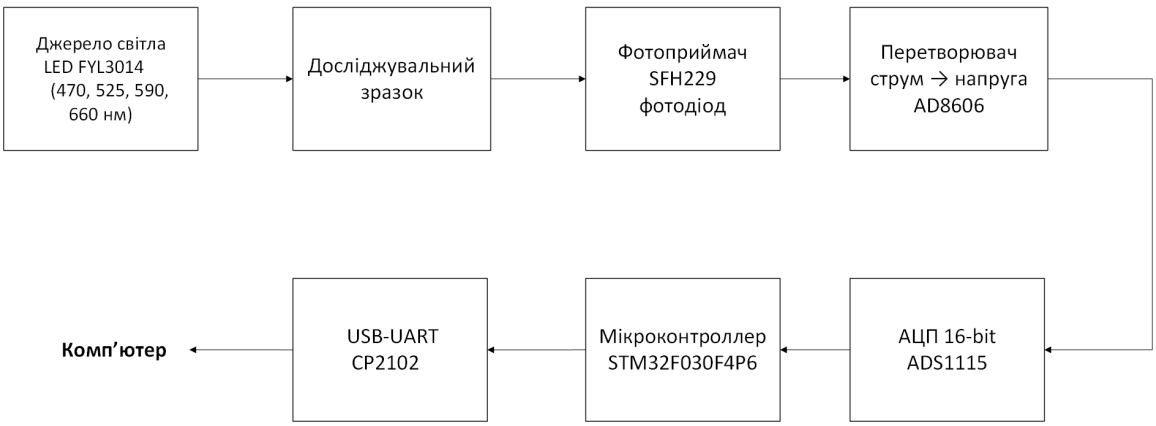


Рис.2. Структурна схема приладу

На першому етапі виконано синтез і підготовку сорбенту. Як основу було використано кремнезем (SiO_2), поверхня якого активувалася шляхом хімічної обробки, після чого на неї наносився реагент полігексаметиленгуанідин (ПГМГ) з подальшою модифікацією специфічними органічними сполуками. Таке покриття забезпечує формування функціональних груп, здатних до комплексоутворення з іонами металів. Синтезований сорбент SiO_2–ПГМГ–реагент характеризується високою питомою поверхнею та рівномірним розподілом активних центрів.

Після підготовки сорбенту здійснювався етап сорбційного концентрування. До проб із відомими концентраціями Fe^{2+}, Fe^{3+} та I_2 додавали певну масу

сорбенту (m = 0,1 г), перемішували протягом 15 хвилин при контрольованому pH середовища (для Fe^{2+} – 4,5–6; для Fe^{3+} – 3,5–4). Після завершення сорбції розчин відділявся, а на поверхні твердого носія утворювались стійкі забарвлені комплекси: Fe(II)–батофенантролін (рожевий), Fe(III)–нітрозо-R-сіль (оранжевий), I_2–7-йод-8-оксихінолін (жовто-зелений). Інтенсивність забарвлення залежала від концентрації металу, що підтверджувалося серією проб із різними вихідними вмістами аналіту.

На другому етапі дослідження було створено оптоелектронну вимірювальну систему, призначену для автоматичного визначення коефіцієнта відбиття R. Для освітлення поверхні сорбенту використовували світлодіоди серії FYL3014 із довжинами хвиль 470, 525, 590 та 660 нм, що відповідають синьому, зеленому, жовтому та червоному спектрам. Як фотоприймач застосовувався фотодіод SFH229 у прозорому корпусі, чутливому до видимого діапазону. Перетворення фотоструму здійснювалося за допомогою операційного підсилювача AD8606, у колі зворотного зв'язку якого встановлено резистор 100 кΩ, що забезпечував коефіцієнт перетворення 100 мВ/1 мкА.

Для високоточного аналого-цифрового перетворення використовувався 16-розрядний АЦП ADS1115 із чотирма каналами, який передавав результати на мікроконтролер серії STM32F0 по інтерфейсу I^2C. Мікроконтролер виконував попередню обробку даних, зокрема компенсацію фонової засвітки. На відміну від традиційних оптичних схем, де застосовується механічне затемнення, запропоновано програмний метод компенсації фону: світлодіод періодично вмикається і вимикається (з періодом 5 с), а мікроконтролер обчислює різницю сигналів, отриманих при обох станах. Це дозволяє повністю виключити вплив зовнішнього освітлення без необхідності екранізації оптичного каналу.

Оброблені цифрові дані передавались до персонального комп'ютера через інтерфейс USB–UART (на базі CP2102), де виконувалася подальша статистична обробка, фільтрація шумів, побудова градуйованих кривих та збереження результатів у базі даних.

Результати експериментів показали високу лінійність аналітичного сигналу в діапазоні концентрацій від 0,1 до 5 мкг/0,1 г сорбенту. Коефіцієнт кореляції для лінійних апроксимацій перевищував 0,98, що свідчить про відтворюваність вимірювань і стабільність оптичної системи. Зі збільшенням концентрації металу відбувалося зниження коефіцієнта відбиття, що узгоджується з теоретичними уявленнями про зростання поглинання внаслідок формування більш інтенсивно забарвлених комплексів.

Отримані результати підтверджують працездатність технічного рішення й ефективність поєднання сорбційного концентрування з твердофазною спектрофотометрією.

Висновки

У результаті виконаної роботи розроблено та експериментально перевірено прототип інформаційно-вимірювальної системи, призначеної для ідентифікації домішкових компонентів важких металів у водних середовищах. Система реалізує поєднання сорбційного методу концентрування з оптичним детектуванням аналітичного сигналу, що дозволяє суттєво підвищити чутливість аналізу при мінімальній кількості реагентів.

Запропонована оптоелектронна схема з використанням світлодіодного освітлення та фотодіодного приймача продемонструвала високу стабільність і точність реєстрації відбитого сигналу. Високорозрядний аналого-цифровий перетворювач і мікроконтролер STM32 забезпечили адекватну швидкодію та точність цифрової обробки результатів.

Розроблена методика дозволяє проводити експрес-аналіз водних проб без необхідності складної підготовки зразків, що робить її перспективною для застосування в автоматизованих системах моніторингу якості води. Отримані результати підтверджують ефективність інтеграції сорбційних процесів із цифровими методами оптичного вимірювання та відкривають можливість подальшої модернізації системи — зокрема, шляхом багатоканального аналізу, віддаленої передачі даних і впровадження у складі екологічних сенсорних мереж.

Література

[1] Крачан, Т & Ямборак, Р. (2024). Джерела походження сполук алюмінію в питній. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 152-158. 10.32782/tnv-tech.2024.1.18.

[2] Дудатьєв, І & Притула, М & Озменчук, І. (2025). Інформаційно вимірювальна система визначення концентрації домішок у воді на основі кондуктометричного. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 69-75. 10.32782/tnv-tech.2025.2.7.

[3] Бєдункова, Ольга & Кузнєцов, П. (2025). Застосування статичних методів аналізу варіацій концентрацій важких металів у поверхневих водах. Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. 4. 3-19. 10.31713/vs420241.

[4] Krasnopyorova, A.P. & Lebedeva, L.T. & Lonin, Oleksii & Sytnik, O.Y. & Yukhno, Galina. (2019). Сорбційно-селективні власти-вості природних та синтетичних цеолітів щодо важких металів у рідких середовищах..

[5] Бєдункова, Ольга & Кузнєцов, П. (2024). Оцінка впливу на навколишнє середовище аналітичних процедур вимірювання макрокомпонентного складу поверхневих вод.. Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. 2. 3-15. 10.31713/vs220241.

[6] Грицюк, Іванна & Safonyk, Andrii. (2021). Розроблення інформаційної системи для спектрофотометричного аналізу. Modeling Control and Information Technologies. 135-136. 10.31713/MCIT.2021.44.

[7] Safonyk, Andrii. (2016). The numerical–asymptotic solution of spatial model of the aerobic water treatment. SCIREA Journal of Mathematics. 1. 197-209.

Аналіз регіональних особливостей сезонного споживання природного газу у західному та центральному регіонах України

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.041

Василь Чабан
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна
vasyl.ya.chaban@lpnu.ua

Федір Матіко
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, НУ «Львівська політехніка»
Львів, Україна
fedir.d.matiko@lpnu.ua

Анотація — **У цій роботі виконано порівняльний аналіз регіональних особливостей сезонного споживання природного газу між західним (Львівська область) та центральним (Київська область) регіонами України. На основі аналізу експериментальних даних про відбір газу промисловими споживачами за період 2017-2022 років, що охоплюють понад один мільйон записів щоденного споживання, встановлено принципові відмінності у сезонних шаблонах споживання між регіонами. Львівська область демонструє помірну сезонність з амплітудою коливань 0.870 та коефіцієнтом кореляції споживання з температурою від -0.75 до -0.82, тоді як Київська область характеризується на 20-25% вищою сезонною нерівномірністю та коефіцієнтом кореляції від -0.85 до -0.90. Виявлені регіональні відмінності обґрунтовують необхідність диференційованих підходів до планування газопостачання, розроблення методик прогнозування споживання та управління резервними потужностями для підтримки енергетичної безпеки України.**

Ключові слова — природний газ, регіональний аналіз, сезонні коливання, температурна залежність, прогнозування, обсяги газу.

I. Постановка завдання

Розробка ефективних стратегій управління газопостачанням та прогнозування споживання природного газу в Україні потребує глибокого розуміння регіональних особливостей, які формуються під впливом кліматичних, географічних та соціально-економічних факторів. Сучасні виклики енергетичної безпеки, що посилились внаслідок військової агресії, актуалізують необхідність точного аналізу споживання на регіональному рівні для забезпечення стабільного газопостачання.

Традиційні підходи до аналізу споживання природного газу часто базуються на узагальнених методах без урахування регіональної специфіки, що призводить до недостатньої точності прогнозування та неефективного розподілу ресурсів. В умовах, коли Україна наближається до самозабезпеченості природним газом з виробництвом понад 30 мільярдів кубічних метрів до 2025 року, регіональний аналіз набуває критичного значення для оптимізації енергетичної системи країни.

II. Методологія дослідження

Дослідження базується на комплексному аналізі експериментальних даних споживання природного газу у Львівській та Київській областях за період 2017-2022 років. Загальний обсяг досліджуваних даних склав понад 1,4 мільйона записів, що охоплюють щоденне споживання по населених пунктах з урахуванням температурних умов та категорій споживачів.

Методологічні підходи до обробки великих масивів даних споживання газу еволюціонували протягом дослідження від використання MATLAB R2023b до комплексної Python-реалізації. Початкова обробка даних у MATLAB дозволила відпрацювати математичні моделі та алгоритми фільтрації на менших обсягах даних, використовуючи пакети Statistics and Machine Learning Toolbox та Curve Fitting Toolbox. Подальший перехід до Python з використанням бібліотек NumPy, SciPy та Pandas забезпечив можливість ефективної обробки повного масиву даних обсягом понад 1,4 мільйона записів.

Фільтрація аномальних значень включала багаторівневу систему перевірок: для Київської області встановлені межі споживання від 2 до 190 м³/добу, для Львівської – від 0 до 200 м³/добу. Нормалізація даних здійснювалася через розрахунок відношення добового обсягу до загального споживання за аналізований період, що дозволило коректно порівнювати споживання між різними днями та споживачами. Застосування потужних методів групування Pandas значно прискорило обробку даних порівняно з циклічними алгоритмами MATLAB, що виявилося критично важливим для аналізу щоденних обсягів споживання по населених пунктах з урахуванням температурних умов та категорій споживачів.

III. Результати дослідження

Результати дослідження виявили принципові відмінності між західним (Львівська область) та

центральним (Київська область) регіонами України. Львівська область демонструє помірну сезонність з амплітудою коливань 0.870, де максимальний індекс споживання в січні становить 1.420, а мінімальний у липні - 0.550. Особливістю регіону є плавні переходи між сезонами: весняний перехід від березня (1.220) до травня (0.820) та симетричний осінній підйом від вересня (0.750) до листопада (1.120).

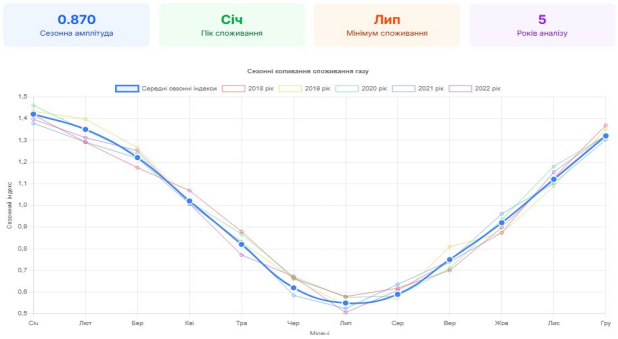


Рис. 1. Порівняння сезонних коливань – Львівська область

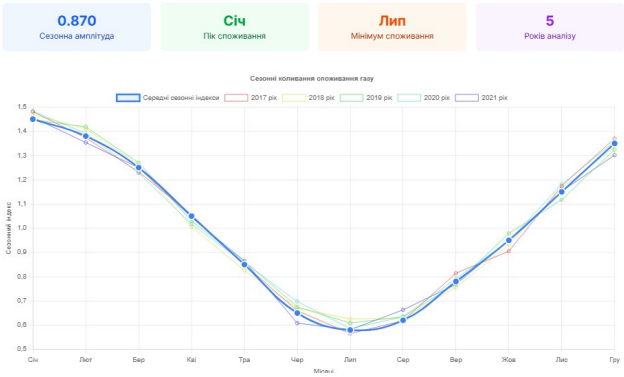


Рис. 2. Порівняння сезонних коливань – Київська область

Київська область характеризується значно вищою сезонною нерівномірністю з амплітудою коливань на 20-25% більшою порівняно з Львівською областю. Зимові максимуми досягають індексу 1.550-1.600, що на 10-13% перевищує відповідні показники західного регіону, тоді як літні мінімуми опускаються до 0.450-0.500. Континентальний характер клімату проявляється у більш різких сезонних переходах та ранішому початку осіннього зростання споживання.

Кореляційний аналіз, виконаний за допомогою функцій бібліотеки Pandas, підтвердив більшу ступінь кореляції обсягів споживання від температурних умов для Київської області з коефіцієнтом кореляції від -0.85 до -0.90. Для Львівської області коефіцієнтом кореляції становить від -0.75 до -0.82. Це свідчить про інтенсивнішу реакцію споживачів центрального регіону на температурні зміни.

Для кількісної оцінки температурних умов та їх впливу на споживання природного газу використовувався показник градусо-днів опалення (ГДО). Градусо-день опалення являє собою добуток різниці між базовою температурою (зазвичай +18°C – температура, нижче якої необхідне опалення приміщень) та середньодобовою температурою зовнішнього повітря на кількість днів у періоді. Цей показник широко застосовується в енергетичних розрахунках, оскільки комплексно відображає як інтенсивність, так і тривалість холодного періоду. Наприклад, місяць із середньою температурою -2°C матиме 620 градусо-днів опалення ((18-(-2))×31 день), що означає значну потребу в опаленні протягом усього місяця.

Градусо-дні опалення для Київської області перевищують аналогічний показник Львівської області на 15-20%, що пояснює не лише вищі абсолютні обсяги споживання, але й більшу амплітуду сезонних коливань. Найбільша різниця спостерігається у січні-лютому, коли Київська область демонструє понад 650 градусо-днів на місяць порівняно з 600 для Львівської області.

Варіабельність споживання також суттєво різниться між регіонами. Коефіцієнти варіації для Київської області систематично вищі на 15-25% порівняно з Львівською областю, що відображає більшу чутливість центрального регіону до погодних аномалій та економічних коливань.

IV. Висновки

Отримані результати мають важливе практичне значення для газової галузі України. Виявлені регіональні відмінності обґрунтовують необхідність диференційованих підходів до планування газопостачання та управління резервними потужностями. Споживачі Київської області потребують більших резервних потужностей для покриття піків споживання через вищу амплітуду сезонних коливань.

Результати дослідження формують основу для створення регіонально-адаптованих систем прогнозування обсягів споживання природного газу та можуть бути використані для підвищення енергетичної безпеки України через оптимізацію регіональних схем газопостачання.

Література

[1] Енергетична стратегія України на період до 2050 року. Затверджено розпорядженням Кабінету міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р.

[2] Jiang, X., Zheng, Y., Xie, H., & Li, X. (2023). Monthly natural gas consumption forecasting using a hybrid WPD-VMD-LSTM model. Environmental Science and Pollution Research, 30(14), 39220-39235..

[3] Zhou, M., Jin, H., Yu, X., & He, Y. (2024). Universal model for natural gas demand forecasting using contrastive learning. arXiv preprint, arXiv:2409.15794.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Прискорення виконання алгоритму зменшення розміру сформованих DEFLATE-блоків за допомогою мемоізації в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.042

Олександр Шпортько
Національний університет водного господарства та природокористуванн
м. Рівне, Україна
ITShportko@gmail.com

Андрій Бомба
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
abomba@ukr.net

Abstract—**Обґрунтована доцільність та описаний механізм використання мемоізації для прискорення виконання алгоритму зменшення розміру сформованих DEFLATE-блоків під час прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат. На прикладі зображень тестового набору ACT показано, що застосування мемоізації для аналітичного способу реалізації цього алгоритму дає змогу прискорити її виконання максимум на 58.9 %.**

Keywords—мемоізація, прогресуюче стиснення зображень, стиснення без втрат

I. Вступ

Будь-яка обчислювальна техніка та мобільні пристрої мають обмежені ресурси (швидкість процесора, обсяг оперативної та зовнішньої пам'ять, місткість зарядного пристрою). Швидші алгоритми дають змогу виконувати більше завдань за той самий час та економлять чи перерозподіляють витрати окремих ресурсів, тому проблема розробки методів для прискорення виконання алгоритмів є актуальною на цей час і залишатиметься такою у найближчому майбутньому. Одним з дієвих підходів для прискорення виконання алгоритмів на сьогодні є мемоізація.

II. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як відомо, мемоізація в програмуванні – це техніка оптимізації, яка полягає у зберіганні результатів виконання функції при заданих значеннях параметрів. Тоді в процесі повторних викликів такої функції з тими ж значеннями параметрів відразу повертається збережене значення, а не виконуються ті ж самі розрахунки ще раз [1; 2]. Також на сьогодні мемоізація використовується не лише для збільшення швидкості виконання програм, а й, наприклад, під час рекурсивного синтаксичного розкладу в узагальненому алгоритмі низхідного синтаксичного аналізу [3] чи при табулюванні значень предикатів в мовах логічного програмування. З іншого боку, для запам'ятовування результатів обчислень найчастіше використовуються масиви, які займають додаткові обсяги оперативної пам'яті [4; 5]. Тому на практиці при використанні мемоізації потрібно віднаходити баланс між додатковими витратами ресурсів обчислювального середовища і прискоренням виконання програми від їх використання. В цій праці ми покажемо, як можна застосувати мемоізацію для прискорення обчислення двійкових логарифмів, як однієї з найуживаніших функцій в процесі реалізації алгоритму зменшення розміру сформованих DEFLATE-блоків [6-9].

III. Використання формату словникової компресії DEFLATE для стиснення зображень без втрат

Загальновідомо, стиснення зображень без втрат найчастіше відбувається максимум в три етапи [9]: на першому яскравості пікселів перетворюються за допомогою предикторів; на другому контекстно-залежне кодування зменшує надлишковості між окремими фрагментами; на третьому контекстно-незалежне кодування усуває надлишковості між переважаючими значеннями яскравостей компонентів пікселів.

Серед контекстно-залежних алгоритмів у форматах графічних файлів найчастіше використовується словниковий алгоритм LZ77 [10], оскільки він забезпечує найшвидше декодування. Описуючи словникові алгоритми, фіксовану кількість попередніх закодованих неподільних елементів (літералів) вхідного потоку називають *словником*, а наступних незакодованих – *буфером*. Алгоритм LZ77 базується на заміні у вихідному потоці послідовності чергових літералів буфера посиланням на аналогічну послідовність літералів словника у вигляді пари чисел <*довжина; зміщення від закінчення словника*>. У випадку відсутності аналогічної послідовності літералів у словнику,

перший літерал буфера переноситься у вихідний потік без змін. Після цього закодовані літерали переносяться з початку буфера в кінець словника і кодування продовжується аналогічно аж до закінчення літералів вхідного потоку. Під час декодування кодів алгоритму LZ77 окремі літерали копіюються у вихідний потік без змін. Пари ж <*довжина; зміщення*> декодуються шляхом послідовного копіювання з кінця вихідного потоку за вказаним зміщенням в кінець вихідного потоку необхідної кількості літералів.

Контекстно-залежне кодування може зменшувати коефіцієнт стиснення у декілька разів в основному за рахунок однакових фрагментів. Але такі фрагменти рідко трапляються у фотореалістичних зображеннях, тому єдиним універсальним етапом стиснення зображень без втрат на сьогодні є контекстно-незалежне кодування.

Основний принцип контекстно-незалежного кодування, яке в процесі стиснення зображень без втрат застосовується для компресії значень окремих елементів, – *довжина коду довільного елемента з більшою ймовірністю не повинна перевищувати довжину коду будь-якого елемента з меншою ймовірністю*. Цей принцип базується на фундаментальному положенні теорії інформації, згідно з яким для мінімізації довжини коду послідовності елемент s_i з ймовірністю появи $p(s_i)$ доцільно кодувати $l_i = -\log_2 p(s_i)$ бітами. Тому середня довжина коду елемента блоку після застосування будь-якого контекстно-незалежного алгоритму згідно з формулою of Shannon [11], не може бути меншою *ентропії джерела*

$$H = -\sum_i p(s_i) \times \log_2 p(s_i). \quad (1)$$

Ентропія джерела зменшується зі збільшенням нерівномірності розподілу ймовірностей (частот) між елементами [11]. Якщо частоту кожного з елементів s_i позначити через N_i , а загальну довжину послідовності – через N (очевидно, що $N = \sum_i N_i$) то, згідно статистичного означення ймовірності, $p(s_i) = N_i / N$, тому

$$l_i = -\log_2 p_i = \log_2 \frac{N}{n_i}. \quad (2)$$

Після застосування контекстно-незалежного алгоритму середня довжина коду наближається до ентропії (1), а загальна довжина блоку наближається до *ентропійної* довжини

$$L_H = N \times H = N \log_2(N) - \sum_i N_i \log_2(N_i). \quad (3)$$

Підвищити ефективність контекстно-незалежного кодування в процесі стиснення зображень без втрат найчастіше намагаються за допомогою *предикторів* [7-9], які під час обходу прогнозують значення яскравості кожної компоненти чергового піксела, використовуючи значення яскравостей тих самих компонентів опрацьованих раніше суміжних пікселів, оскільки дані яскравості мають між собою найбільшу степінь кореляції. В процесі використання цього підходу обчислюють і надалі кодують відхилення Δ_{uv} значення яскравості чергової компоненти піксела F_{uv} від прогнозованого обраним предиктором значення $predict_{uv}$, тобто

$$\Delta_{uv} = F_{uv} - predict_{uv} \quad (4)$$

(*u* та *v* пробігають відповідно по всіх рядках та стовпцях компонентів пікселів зображення). Суміжні пікселі зображення найчастіше мають подібні кольори, а значить і близькі значення яскравостей відповідних компонентів, тому значення прогнозу часто збігається зі значенням яскравості чергової компоненти, найчастіше – є близьким до цього значення і рідко – значно відрізняється від нього. Тобто більшість значень Δ_{uv} виявляються близькими до нуля, що збільшує нерівномірність розподілу і, як наслідок, зменшує ентропію (1).

Природно, що алгоритм декодування кодів LZ77 має розрізняти окремі літерали та групи <*довжина; зміщення*>. У форматі DEFLATE [6] з цією метою довжини замін та окремі літерали алгоритму LZ77 кодуються разом числами в межах [0; 285]. При цьому числа з діапазону [0; 255] відповідають кодам окремих літералів, 256 позначає закінчення блоку, а числа з діапазону [257; 285] вказують на базові значення довжин. Після базових значень довжин міститься визначена форматом кількість бітів, що разом з базовим значенням однозначно визначає довжину заміни. Зміщення зберігається після відповідної довжини заміни аналогічно – у вигляді базового значення та додаткових бітів. Базове значення зміщення знаходиться в межах [0; 29]. В DEFLATE максимальне значення довжини закодованої послідовності може сягати 258, зміщення – 32768, а для кодування базових значень літералів/довжин та зміщень застосовуються різні коди HUFF [12]. Ми модифікували формат DEFLATE, застосувавши замість кодування HUFF арифметичне кодування [13], оскільки його середня довжина коду ближча до ентропії (1).

Зменшити розмір DEFLATE-блоків, розрахованих з використання (3), можливо шляхом відкидання неефективних замін алгоритму LZ77, довжина коду яких перевищує суми довжин кодів окремих літералів, які вони заміняють. Ми розробили два способи такого зменшення – *синтетичний*, який аналізує довжину коду заміни LZ77 відносно сформованого розподілу [7], та *аналітичний*, який розраховує довжину DEFLATE-блоку після можливого врахування чи повернення такої заміни.

IV. Застосування мемоізації для прогнозування довжини DEFLATE-блоків

Зрозуміло, що мемоізацію доцільно застосовувати до функцій з дискретними

значеннями аргументів, адже тоді її результати можливо зберігати в масиві з індексами-значеннями цих аргументів. Тому для обчислення довжини ентропійного коду (2) ми виконали перехід від двійкового логарифму дійсного значення його ймовірності до різниці логарифмів цілих кількостей всіх елементів та частоти чергового елемента:

$$l_i = -\log p_i = \log\frac{N}{n_i} = \log N - \log n_i . \qquad (5)$$

Відповідна функція для обчислення двійкового логарифму від цілого числа з використанням мемоізації мовою C++ використовується нами у такому вигляді:

```
double log2(UBYTE4 x)
 {if (x<MaxMemoizationLog2)
   {if (arrayLog2[x]<0)
     arrayLog2[x]=log(x)*1.4426950409;
    return arrayLog2[x]; }
  return log(x)*1.4426950409; }   ,
```

де *MaxMemoizationLog2* – кількість елементів в масиві *arrayLog2* для зберігання результатів мемоізації двійкового логарифму. Вплив цієї функції на час кодування ми дослідимо далі. Значення двійкового логарифму від додатних цілих чисел невід'ємні, тому на початку роботи кодера ми ініціалізуємо елементи масиву *arrayLog2* значенням -1. Якщо цілий додатний аргумент цієї функції не входить в діапазон індексів масиву мемоізації (надалі – діапазон мемоізації), то її значення обчислюється за допомогою стандартної математичної функції log(*x*). Інакше виконується перевірка наявності попереднього розрахованого значення двійкового логарифму від цього аргумента і у випадку, коли таке значення ще не розраховувалося (тобто *arrayLog2*[*x*]<0), двійковий логарифм від аргументу обчислюється і зберігається в масиві. Після цієї перевірки функція повертає обчислене раніше значення двійкового логарифму з масиву *arrayLog2*. Тобто для значень, які входять в діапазон мемоізації, двійковий логарифм обчислюється перший раз і зберігається в масиві, після чого надалі при наступних викликах функції береться з цього масиву, а не обчислюється ще раз.

При такому підході обчислюються не всі значення з діапазону мемоізації, а лише ті, які хоча б раз використовуються при розрахунках. Після застосування предикторів [4] частоти більшості елементів стають близькими до нуля, тому ми виконували мемоізацію саме для найменших додатних значень аргументу.

Проаналізуємо тепер зміни часу виконання синтетичного і аналітичного способів алгоритму зменшення розміру сформованих DEFLATE-блоків [6] для стиснення зображень набору ACT [14] в залежності від діапазонів мемоізації (TABLE I-II та Figure 1). Цей набір містить як дискретно-тонові (№№ 1, 2, 7), так і фотореалістичні (всі інші) зображення.

TABLE I. ЧАС ВИКОНАННЯ СИНТЕТИЧНОГО СПОСОБУ АЛГОРИТМУ ЗМЕНШЕННЯ РОЗМІРУ СФОРМОВАНИХ DEFLATE-БЛОКІВ ПРИ СТИСНЕННІ ЗОБРАЖЕНЬ НАБОРУ ACT ДЛЯ РІЗНИХ ДІАПАЗОНІВ МЕМОІЗАЦІЇ, С

Діапазон мемоізації	**№ файла**								**Середній час**
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	
∅	0.07	0.12	0.03	0.25	0.13	0.58	0.05	0.15	0.17
[1; 99]	0.05	0.12	0.03	0.24	0.13	0.55	0.05	0.14	0.16
[1; 999]	0.05	0.11	0.03	0.24	0.13	0.55	0.05	0.14	0.16
[1; 4999]	0.05	0.11	0.03	0.24	0.13	0.55	0.05	0.14	0.16
[1; 9999]	0.05	0.11	0.03	0.24	0.13	0.55	0.05	0.14	0.16

TABLE II. ЧАС ВИКОНАННЯ АНАЛІТИЧНОГО СПОСОБУ АЛГОРИТМУ ЗМЕНШЕННЯ РОЗМІРУ СФОРМОВАНИХ DEFLATE-БЛОКІВ ПРИ СТИСНЕННІ ЗОБРАЖЕНЬ НАБОРУ ACT ДЛЯ РІЗНИХ ДІАПАЗОНІВ МЕМОІЗАЦІЇ, С

Діапазон мемоізації	**№ файла**								**Середній час**
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	
∅	0.32	0.61	0.36	1.42	0.97	3.62	0.24	1.02	1.07
[1; 99]	0.21	0.44	0.21	1.12	0.78	2.92	0.18	0.82	0.84
[1; 999]	0.19	0.38	0.21	1.05	0.64	2.38	0.14	0.72	0.71
[1; 4999]	0.16	0.34	0.17	0.82	0.56	1.74	0.12	0.50	0.55
[1; 9999]	0.14	0.34	0.15	0.54	0.44	1.39	0.12	0.39	0.44

Бачимо, що мемоізація суттєвіше прискорює стиснення фотореалістичних зображень відносно дискретно-тонових. Це пояснюється більшою часткою неефективних замін і, відповідно, більшою кількістю ітерацій алгоритму, що призводить до частіших обчислень двійкових логарифмів. Застосування мемоізації суттєво прискорює (в середньому по набору ACT – максимум на 58.9 %) виконання реалізації аналітичного способу зменшення розміру сформованих DEFLATE-блоків і майже не впливає на час виконання реалізації синтетичного способу (прискорює максимум на 5.9 %). І це закономірно, адже синтетичний спосіб зменшення розміру DEFLATE-блоків використовує функцію обчислення двійкових логарифмів, перераховуючи довжини кодів елементів розподілів на кожній ітерації після аналізу **всіх** замін, а аналітичний спосіб для аналізу ефективності **кожної** заміни викликає цю функцію в середньому не менше десяти разів.

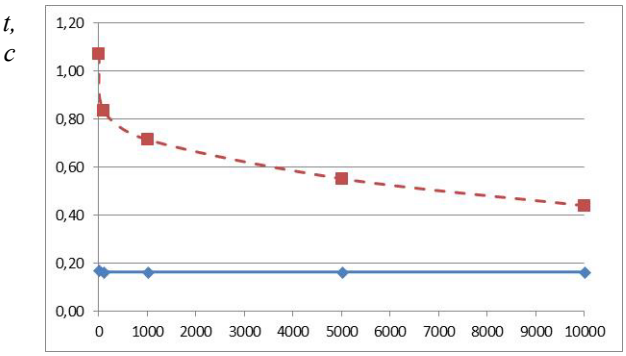


Figure 1. Залежність середнього часу виконання від ширини діапазону індексів масиву мемоізації для синтетичного (суцільна лінія) та аналітичного (пунктирна лінія) способів алгоритму зменшення розміру DEFLATE-блоків при стисненні зображень набору ACT

На реалізацію синтетичного способу в середньому по набору ACT припадає 9.3 % загального часу кодування, на виконання аналітичного способу без мемоізації – 38.2 %, а на роботу аналітичного способу з масивом мемоізації розміром біля 78 Кб – 20.3 % (останній рядок

TABLE II). Саме такий масив ми рекомендуємо використовувати на практиці для аналітичного способу зменшення розміру DEFLATE-блоків. Оскільки синтетичний та аналітичний способи алгоритму забезпечують приблизно однакові коефіцієнти стиснення, а перший з них – суттєво швидший, то в кодерах ми рекомендуємо реалізовувати саме синтетичний спосіб алгоритму зменшення розміру сформованого DEFLATE-блоку.

V. Висновки

Наведені результати підтверджують відому закономірність: чим більше значень запам'ятовується в процесі мемоізації – тим швидше виконання програми. Але самого лише збільшення масиву мемоізації для суттєвого прискорення програми недостатньо (як для синтетичного способу зменшення розміру DEFLATE-блоку на Figure 1). Потрібно, щоб ще й значення, які зберігаються в масиві мемоізації, використовувалися багаторазово. Зазначимо також, що кожен стиснутий блок в нашій реалізації (і, відповідно, частота окремого елемента) та змішення заміни у форматі DEFLATE не перевищують 32768. Тому використання більших масивів мемоізації не призведе до прискорення кодування.

Крім використання додаткових обсягів оперативної пам'яті, реалізація мемоізації ще й збільшує розмір коду, тобто розмір самого кодера. Тому для реалізації синтетичного способу зменшення розміру DEFLATE-блоку використовувати мемоізацію недоцільно, а для аналітичного способу вона дає суттєвий (до 58.9 %) виграш у часі кодування.

Література

[1] О. В. Шпортько, К. М. Малаш, "Застосування мемоізації в задачах мінімізації кількості знаків арифметичних операцій," Вісник Національного університету водного господарства та природокористування (Серія: Технічні науки). Рівне: НУВГП, 2020, № 2 (90), С. 127-143. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/19764/.

[2] O. V. Shportko, A. Ya. Bomba, K. M Malash, "Using of memoization in arithmetic operations sign placement problems," Modern problems of mathematical modeling, automates control and information technologies : materials of IIIth International scientific and practical conference (Rivne, 14-16 november, 2019). Rivne: National university of water and environmental engineering, 2019, pp. 202-207.

[3] J. Mayfield et all, "Using Automatic Memoization as a Software Engineering Tool in Real-World AI Systems," Proceedings of the Eleventh IEEE Conference on Artificial Intelligence for Applications (CAIA '95), 1995, pp. 87-93.

[4] A. Umut et all, "Selective Memoization," Proceedings of the 30th ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages, New Orleans, Louisiana, 2003, pp. 14–25.

[5] P. Norvig, "Techniques for Automatic Memoization with Applications to Context-Free Parsing," Computational Linguistics, vol. 17, 1991, № 1, pp. 91–98.

[6] P. Deutsch, "DEFLATE Compressed Data Format Specification version 1.3," RFC 1951, 1996, Alladin enterprises,- May 1996, 15 p.

[7] О. В. Шпортько, "Оптимізація застосування модифікованого формату словникової компресії Deflate у процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат," Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (Серія: Комп'ютерні системи та компоненти), 2013, Т. 4, Вип. 4, С. 40-52.

[8] A. Ya. Bomba, A. V. Shportko, V. A. Postolatii, "Redistribution of the Compressed Data Between Modified DEFLATE-Blocks in the Image Compression Process Without Lossless," Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2024) : Proceedings of the 8th International Conference (Lviv, 12-13 Apr 2024). Volume II: Modeling, Optimization, and Controlling in Information and Technology Systems Workshop (MOCITSW), pp. 145-156. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3668/paper11.pdf.

[9] О. В. Шпортько, "Пристосування формату словникової компресії DEFLATE до ієрархічного стиснення зображень без втрат," Оброблення сигналів і зображень та розпізнання образів : Праці дванадцятої Всеукраїнської міжнародної конференції УкрОБРАЗ'2014 (3-7 листопада 2014 року). Київ: МННЦ ІТтС, 2014, С. 151-154.

[10] J. Ziv, A. Lempel, "A universal algorithm for sequential data compression," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 23(3), 1977, pp 337-343, DOI: 10.1109/TIT.1977.1055714.

[11] C. E Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," Bell System Technical Journal, 1948, vol. 27, pp. 379-423, 623-656, DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x.

[12] D. Huffman, "A Method for the Construction of Minimum Redundancy Codes," Proceedings of the IRE, 19526 № 40 (9), pp. 1098-1101, DOI: 10.1109/JRPROC.1952.273898.

[13] J. Rissanen, G. G. Langdon, "Arithmetic coding," IBM Journal of Research and Development, 1979, № 23 (2), pp. 149-162. DOI: 10.1147/rd.232.0149.

[14] *ACT – Test Files*. [Online]. URL: http://compression.great-site.net/act/act-files.html.

СЕКЦІЯ 4

ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IoT) ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ

MCIT Modeling, control & information technologies

A Comprehensive Methodology for Authorship Attribution of Literary Textual Works

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.043

Rustam Azimov
Laboratory of recognition, identification
and methods of optimal solutions
Institute of Control Systems
Baku, Azerbaijan
rustemazimov1999@gmail.com

Abstract—**This study presents a comprehensive framework for authorship recognition, specifically tailored for literary works of fiction. There are two peculiarity of the considered problem. First, the problem involves authorship attribution of both large and small literary works. Second, the texts which are available for identification and testing of a recognition model are quite limited, since many writers write only a few literary works throughout their lives. In the study approaches used for addressing the aforementioned issues. Computer experiments were carried out on the Azerbaijani writers example.**

Keywords—authorship attribution, stylometry, machine learning, feature engineering, Azerbaijani language

I. Introduction

The analysis of textual authorship has evolved from a niche literary pursuit into a critical discipline with applications in cybersecurity, forensic linguistics, legal disputes, etc. The core challenge lies in identifying quantifiable stylistic markers that are consistent for an author yet discriminative across different authors. This problem, known as authorship attribution or authorship identification, operates on the premise that every author possesses a unique, measurable "stylistic fingerprint" and each text of that author is considered to constitute a stylistic event as a variation of "stylistic fingerprint" in some sense [1, 2].

Most of the scientific studies regarding authorship attribution relies on the following types of texts:

- journalistic texts in news, magazines,
- software source codes,
- fiction literature.

The first attempts to use computational textual stylistics – stylometry for analysis of a text was carried out the fiction texts which were about the historical disputes, such as the authorship of the Federalist Papers or the works of Shakespeare. The advent of the internet and the proliferation of digital text archives have exponentially increased the availability of texts, consequently, research has expanded to include the authorship analysis of online content, such as news articles, blog posts, and social media messages, alongside traditional literary works [3–5].

The paper is devoted to analyze the effectiveness of the used methodology for authorship attribution of literary fiction textual works. The methodology allows to build machine learning based models for recognition of authors of small as well as large literary works (e.g. novels, short stories).

II. Dataset

A. Data Acquisition

The foundation of any robust authorship attribution system is a high-quality, representative dataset. For this study, we compiled a collection of literary works from eleven renowned Azerbaijani writers. The initial dataset, designated as Dataset-0, consisted of 151 texts: 28 large works (e.g., novels, novellas) and 123 small works (e.g., short stories). The distribution of works per author was uneven, reflecting their actual literary output, with the number of large works ranging from 1 to 5 and small works from 0 to 46 per author.

B. Data Augmentation

A common challenge in machine learning, particularly with literary texts, is the scarcity of data for training complex models. To mitigate this, we used a dataset augmentation strategy. Each of the 28 large works in Dataset-0 was divided into 10 separate, non-overlapping parts of approximately equal length. This process transformed Dataset-0 into Dataset-1, which contained 403 individual text samples (123 original small works and 280 text segments from large works). This approach significantly increased the number of observations, providing more data for the parametric identification of models and for feature selection procedures. Dataset-1 was subsequently split into a training set (approximately 80% of the texts, or 325 samples) and a test set (approximately 20%, or 78 samples), ensuring a representative distribution of authors in both sets.

The effectiveness of the trivial data augmentation strategy was analyzed using the two empirical analyses approaches.

The first empirical analysis checks the similarity of the segments to each other using a known statistical metric – variance to ensure the text segments of a literary work shows similar characteristics in terms of stylometry. This analysis was done on an example of a writer's large novel, which was segmented into 10 parts, then number representations of these 10 parts was compared using the variance value over each text feature.

The second analysis measures the relation among the following on a given feature:

- mean difference among the 10 segments of a large work,
- mean difference among 10 short stories (of the same author),
- pairwise mean difference among short stories and segments of the large text.

If the latter is somewhere in the middle of the other two over a feature, it means this feature is representative and effective in terms of data augmentation for text classification problems (here authorship attribution).

III. Textual Feature Extraction and Selection

The core of authorship attribution lies in defining and extracting features that capture an author's unique stylistic signature. We investigated five primary classes of textual features, calculating their values for each text in our dataset.

- **Sentence Length Frequency:** This feature captures an author's propensity for using short or long sentences. We calculated the normalized frequency distribution of sentences based on their word count (e.g., the proportion of sentences with 5 words, 10 words, etc.) for each text. This reveals syntactic complexity and narrative pacing habits.
- **Word Length Frequency:** This measures the normalized distribution of word lengths (number of characters per word) within a text. It reflects an author's vocabulary complexity and preferences, indicating whether they favor concise or more elaborate diction.
- **Character N-gram Frequency:** This powerful feature type involves calculating the normalized frequencies of all possible contiguous sequences of 'n' characters (e.g., for n=1: "a", "b", "n"; for n=2: "ab", "an", "in"). Character n-grams are language-agnostic and can capture sub-word stylistic patterns, such as common prefixes, suffixes, and other morphological constructs inherent to the Azerbaijani language. We focused on unigrams (n=1) and bigrams (n=2).
- **Character N-gram Frequency Variance:** We proposed a novel feature based on the stability of character n-grams within a text. Each text was divided into several contiguous parts. For each character n-gram, we calculated its frequency within each part and then computed the variance of these frequencies across all parts. A low variance indicates an n-gram that is used consistently throughout the text, potentially offering a more robust and stable stylistic marker than raw frequency alone.
- **Word Frequency (Bag-of-Words):** This classic approach involves calculating the normalized frequencies of specific words in a text. We explored different strategies for selecting which words to use as features. Beyond simple frequency, we also experimented with using meta-features: the frequency of a word in the unified text of each candidate author (from the training set) and its frequency in the entire training corpus. This adds a relative, author-specific context to the raw word count.

Given the potentially vast number of features (especially for character n-grams and words), we implemented and compared several feature selection procedures. For words, one procedure selected the most frequently used words for *each author individually*, then merged these lists. Another procedure selected the most frequent words across the *entire training set*, irrespective of author. We also experimented with manual curation, removing non-discriminative words like common function words or character names. For character n-grams, a similar procedure selected the most frequent n-grams across the training set. Additionally another procedure was used to select character n-grams which differs in characterizing an author from authors, here characterizing degree of an author on a n-gram is defined based on the mean difference among the texts of an author.

These features were then grouped into different feature sets. Some sets contained features from a single type (e.g., only character bigrams), while others were mixed, combining features from different types (e.g., sentence length and word length frequencies together) to investigate potential synergistic effects.

IV. Experiment Results

A. Machine Learning methods used in the study

To perform the actual authorship attribution, we employed several established machine learning models, known for their effectiveness in text classification tasks [6]:

- **Support Vector Machine (SVM):** We utilized the Radial Basis Function (RBF) kernel.
- **Random Forest (RF):** We used 100 trees with a maximum depth of 5.
- **Artificial Neural Network (ANN):** We used multilayer feedforward networks with two hidden layers. The number of neurons was varied based on the input feature vector size. The models were trained using the Adam optimization algorithm with an early stopping criterion.

The experiments were carried out using the program libraries Scikit-Learn and Keras [7, 8].

B. Results on analyzing the effectiveness data augmentation approach to discriminate texts of different authors

Let's look through the variance values among the text segments of a literary work on the following bigram examples

ər, di, də, ən, lə, la, ar, in, da, an

are the following

0.0983, 0.0012, 0.0014, 0.0014, 0.0014, 0.0015, 0.0015, 0.0017, 0.0018, 0.002.

Since the provided variance values are quite small it means that using these bigrams ensures that dividing a literary work into non-overlapping text segments does not distort the author stylistics significantly.

On the second analysis we consider that if the mean value of pairwise differences among small work and large work part pairs is in the middle of mean value of small works and mean value of the large work parts, the large text segmentation approach is legitimate in terms of discriminating different authors' texts. For example on the following bigrams

cl, şh, mp, ıı, aə, bk, je, ğs, pt, mx

the differences from the difference indicator among short works and large work parts and the mean of the other mean values are the following:

1.76438E-07, 1.35125E-07, 1.05477E-07, 9.55283E-08, 9.46659E-08, 9.4265E-08, 5.83959E-08, 5.30525E-08, 4.16172E-08, 6.44E-10.

These differences are quite small that it means "being in the middle of the other" assumption is not incorrect.

The results on the other most bigrams were analogical to the results provided before.

C. *Results of recognition effectiveness*

The maximum recognition accuracies on different machine learning models and features selection procedures were given in Figure 1. As it seems from the figure 1 using the character n-gram frequencies and bag of words features were quite successful in the dataset-0 – fiction literature works. As it is clear from the results on the Test set with 75% reliability criterion frequencies of character n-grams were better than the frequencies of words – bag of words features.

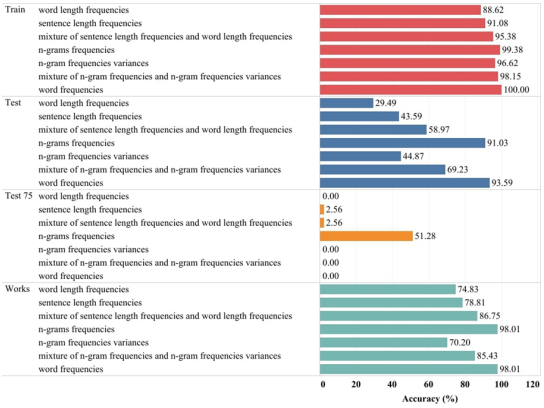


Figure 1. Recognition effectiveness evaluation metric results of text feature classes

Maximum recognition accuracies on different machine learning methods were given according to the results on different text sets in Figure 2. As it is clear from the figure multilayer feedforward artificial neural networks were not quite effective in recognition. Nevertheless the recognition accuracies when using SVM or Random Forest is about 98%. The results show that SVM was more reliable (see the results on the Test 75 row.

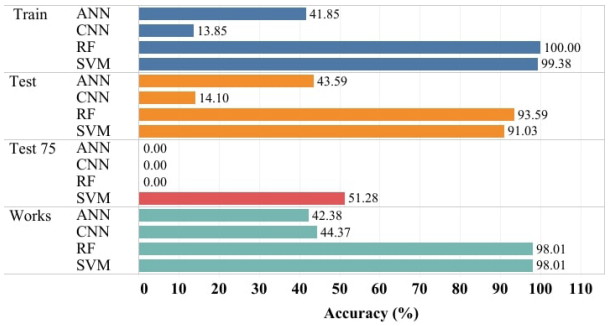


Figure 2. Recognition effectiveness evaluation metric results of machine learning methods

V. Conclusion

In the scientific study challenges of authorship attribution of fiction literature works were addressed by a framework – methodology. This methodology includes diving a large fiction work to parts, analyzing the effectiveness of this on discriminating authors' texts, examining different text representations and feature selection procedures for using machine learning methods on authorship recognition.

References

[1] He, X.; Lashkari, A.H.; Vombatkere, N.; Sharma, D.P. Authorship Attribution Methods, Challenges, and Future Research Directions: A Comprehensive Survey. Information 2024, 15, 131. https://doi.org/10.3390/info15030131.

[2] Stamatatos, E. (2009). A survey of modern authorship attribution methods. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 60(3), 538–556.

[3] Anisimov, A.V.; Porkhun, E.V.; Taranukha, V.Y. Algorithm for construction of parametric vectors for solution of classification problems by a feed-forward neural network. Cybern. Syst. Anal. 2007, 43, 161–170.

[4] Aida-zade, K.R., Azimov, R.B.. Analysis of the use of text features in the authorship identification of literary works in the Azerbaijani language // Informatics and Control Problems, – Baku, Azerbaijan: – 2024, v. 44, no. 1, – pp. 51-58.

[5] Azimov, R.B. (2024). Comparative analysis of using different text features, models, and methods in text author recognition. Cybernetics and Systems Analysis.

[6] Géron, A. (2019). Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow (2nd ed.). O'Reilly Media.

[7] Pedregosa, F., et al. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12, 2825–2830.

[8] Chollet, F. (2015). Keras. GitHub repository. https://github.com/fchollet/keras.

MCIT Modeling, control & information technologies

System of artificial intelligence as a model of natural intelligence

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.044

Volodymyr Kovtunets
Higher Education and Labor Market Department
Institute of Higher Education of NAES of Ukraine
Kyiv, Ukraine
vkovtunets@ukr.net

Oles Kovtunets
Department of Computer Science and Software Engineering
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
o.kovtunets@kpi.ua

Abstract— **Artificial intelligence systems (AIS) are studied for adequacy and accuracy as models of natural human intelligence. The capabilities of AIS are studied from the standpoint of the theory of computation and logic. The study focuses on the capabilities of artificial neural networks, which are the core of AIS. It is shown that there exist unsolvable for AIS problems, unlike humans. In addition, AIS is unable to transform sets of facts into new knowledge like humans due to the insufficient development of inductive logic methods. The prospects for the development of AIs as models of natural intelligence are assessed depending on the development of super-tuning neural networks, as well as quantum computing.**

Keywords—artificial intelligence; artificial intelligence system; inductive logic; Turing machine; neural networks.

I. INTRODUCTION

Modern artificial intelligence systems (AIS) implemented on modern computers, i.e. implemented by Turing machines, are considered. These are powerful information systems on multiprocessor computers or computer clusters.

AI allows solving complex problems where, traditionally, it was necessary to use exclusively human labor. This situation, and, in particular, the advertising campaign in the media, creates the feeling that AIS is an analogue of a person, but significantly more powerful. Humanity is worried about its future, in which, according to some people, AI will overcome and subjugate humans.

To respond to these predictions and possible challenges, it is necessary to understand to what extent AI are adequate and accurate models of natural human intelligence.

The answer to this question can have profound methodological consequences.

.

II. COMPUTATION THEORY AND AIS

The concept of artificial intelligence was developed by A. Turing. He put the task of developing algorithms that could think like a human thinks.

Turing's theoretical invention - the Turing machine - was an important step in defining an algorithm. The Church-Turing thesis states that any function that can be computed algorithmically or in another efficient way can be computed by some Turing machine. The thesis is more of a hypothesis or can be considered as a definition of an algorithm.

Computers are built on the basis of the von Neumann architecture and are capable of implementing algorithms, that is, procedures that can be described by a Turing machine. Therefor, it should be noted that an AI system in the theoretical sense is also a Turing machine [1]. A computer that implements the software of an AIS is a high-power multiprocessor complex with large amounts of memory, built according to the von Neumann architecture (or a network of such computers), which can be described (albeit quite complex) by a Turing machine.

In this technological sense, an AIS is no different from the information systems familiar to modern people. A significant difference is the use of natural human language based on Large Language Models (LLM) technologies, which creates the illusion of communication with a person, and such systems thus claim to pass the Turing test.

However, a Turing machine has significant limitations in its capabilities - it cannot solve all problems. Whereas sooner or later, a person still solves problems (yes, many mathematical problems that were not solved for a long time have now been solved and the persistence of mathematicians is not wasted).

It is worth noting that an important example of algorithmically unsolvable problems is the halting problem of a Turing machine - it is impossible to write a Turing machine that, for every Turing machine, can answer the simple question: will the Turing machine halt after executing a finite number of instructions?

This Turing result was generalized in 1953 by Rice [2].

Rice's theorem [3]. The problem of recognizing any non-trivial (such that is true for some programs and false for others) semantic property of a language that is recognized by a Turing machine is unsolvable for a Turing machine.

In this case, a property of language is called semantic (neutral) if it is possessed by a non-empty set of statements expressed in the language, and similarly, a non-empty set does not possess it.

It follows from Rice's theorem that the problem of establishing the range of tasks that a Turing machine can solve will be unsolvable. In particular, it is impossible to establish by algorithmic means that a Turing machine (computer program) performs exactly the work that its

developers planned for it. That is, testing programs should be performed by a person, not a computer.

Regarding AIS, this fact is interesting in that it probably indicates the main drawback of AIS in its modern form - the inability to work with itself, that is, the impossibility of self-awareness, which actually most significantly distinguishes a person from AI.

Therefore AIS cannot possess self-awareness and consciousness.

Experiments with AI systems that included questions related to self-identification show that the system makes contradictory statements in such cases, and it is precisely such questions that allow us to show that the Turing test remains relevant for detecting AIS.

But the limitations of AIS are even more significant. Artificial neural networks are the core of AIS because just these are capable to realize machine learning on non-structured data collected from Internet resources and “to think like a human”.

In the general case, the set of artificial neural networks (ANN) is only a subset of the set of all Turing machines. That is, not all algorithms can be implemented by ANN. Only for a special class of ANN - recursive artificial neural networks - has it been proven that this class is equivalent to a Turing machine [4].

Therefore as well as ANN should simulate human mental activity one should conclude that such simulation is weaker than Turing machine (i.e. algorithm). As we saw above human mental activity is stronger than performance by algorithm.

So to consider the problem more deeply we compare human logic and formal logics of computing.

III. Logic and AIS

Logic is the science of the laws (regularities) of human thinking, considering the acquisition of new knowledge as one of the main tasks of thinking. Since the task of AIS is to create computers and computer programs capable of thinking similarly to humans, logic should be the theoretical basis for AIS.

The best developed is deductive formal logic, which justifies the correctness of logical conclusions by deductive reasoning: if statement A is true, and the true statement that follows from A is B, then statement B is also true.

Formal logic was introduced in a systematic form by Aristotle. Descartes, Leibniz, and J. Boole made a significant contribution to its becoming the basis of mathematical logic, which (in particular, the calculus of statements and the calculus of predicates) is the theoretical foundation for both building a computer and developing programs that imitate human thinking.

However, binary logic of predicates turned out to be insufficient for describing all processes of human thinking. Today, within the framework of formal logic, we have multivalued logics, modal logics, fuzzy logic etc.

At the end of the 19th and beginning of the 20th centuries, the development of mathematical logic initiated a certain euphoria in the hopes of proper substantiation of scientific creativity, in particular, substantiation of the consistency of mathematics (arithmetic). A serious reason was the unexpected results in geometry and physics: non-Euclidean geometries and the general theory of relativity. Euclidean geometry, built on strict logical reasoning according to the laws of Aristotle, lost its logical coherence when it turned out that one of the axioms (Euclid's fifth postulate) is not inevitably true, despite everyday obviousness.

This forced us to reconsider the foundations of scientific theories. D. Hilbert in 1900 set an ambitious task - to prove the consistency of arithmetic [5]. Less than half a century later, K. Gödel showed that it is impossible to do this within the limits of the science of arithmetic itself.

By the way, R.Penrose [6] based on Gödel's theorem, made the conclusion that AI is unable to solve all the problems that humans can solve.

Aristotle's logic turned out to be reliable to the extent that the truth of statement A is reliable in its logical derivation.

But statement A (let's call it an axiom) is the result of not deductive, but inductive thinking - the transition from observation and collection of facts to generalization in the form of knowledge.

The features of deductive and inductive thinking for substantiating new knowledge were investigated by W. Minto in [7]. W. Minto considers two ways of thinking for the purpose of obtaining new knowledge - deductive and inductive - as complementary to each other. It is interesting to note that the first chapter of the second book of W. Minto's monograph on inductive thinking is called "Inductive logic, or the logic of science".

If we assume that AI is fully capable of thinking like a person, it is necessary to show the ability of AI to find qualitatively new knowledge (mathematicians sometimes call this process the word "eureka", understanding by it the unexpected after long work on the problems of discovering something, if not unexpected, then certainly fundamentally new).

An example of such discoveries can be A. Einstein's discovery of the constancy of the speed of light regardless of the reference frame, which actually became the impetus for the creation of the special theory of relativity, and on its basis - the general theory of relativity. There are no basic facts from which this statement can be deduced deductively. There was not at that time a sufficient number of reliable observations that would allow this fact to be deduced inductively.

Another example can be taken from mathematics - the discovery of non-Euclidean geometry. The physical interpretation of the non-Euclidean geometry of Gauss-Bolyai-Lobachevsky was found much later than the discovery of geometry itself.

Understanding the imperfection of formal logical systems led to further searches, in particular, informal logics, which are considered in the context of natural human language [8].

As a conclusion to this subsection, it must be recognized that no formal or informal theory of logic describes all the thinking processes that a person is capable of. Therefore AIS simulation of human thinking is not rather relevant.

IV. PROSPECTIVES

Arguments above do not allow us to state the high quality of AIS modeling of human natural intelligence. Currently, AIS can successfully (and faster!) perform intellectual work if a person can do it, and the person has trained AIS well.

Professionals in various fields are aware of the risks of unprofessional and uncritical use of AIS [9]. This does not become an obstacle to the use of AIS where they produce useful results.

In particular, in the work [10], based on the analysis of the theoretical foundations of AIS and judicial practice in different countries, it is shown that AI cannot be subjects of legal relations.

At the same time, AIS technologies are also developing. The limitations of AIS as shown above, stem from the fact that artificial neural networks of a discrete nature are at best (recurrent) identical to Turing machines, and therefore their "mental" capabilities do not go beyond the limits of conventional information systems. However, it has been proven that going beyond the limits of discreteness, that is, building neural networks where the weights are real numbers, allows us to surpass the Turing machine, they are "super-Turing" [11]. Such networks can solve problems that are unsolvable by the Turing machine. A similar statement applies to neural networks with variable (not static) weights. These results illustrate the limitations of just digital technologies based on discretization.

A. Turing understood the limitations of the Turing machine he developed and in 1939 proposed expanding the machine by including a hypothetical oracle capable of computing some non-recursive function, possibly uncomputable by the Turing machine. Such a machine is "super-Turing" but does not eliminate the problem of unsolvability: there are also unsolvable problems for it.

Researchers hope for the capabilities of quantum computers, which, working with qubits - functions with $L_2(R)$, can be significantly more powerful. However, the quantum processors created so far remain Turing machines.

REFERENCES

[1] Turing machine. 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Turing_machine

[2] Rice, H. G. Classes of recursively enumerable sets and their decision problems. *Transactions of the American Mathematical Society*, 1953, 74 (2). pp. 358–366, doi:10.1090/s0002-9947-1953-0053041-6.

[3] Stuart, T. Understanding Computation: From Simple Machines to Impossible Programs. O'Reily. 2013.

[4] Graves, Alex; Wayne, Greg; Danihelka, Ivo (2014). "Neural Turing Machines". arXiv:1410.5401.

[5] Hilbert's Problems: 23 and Math. 2024. https://www.simonsfoundation.org/2020/05/06/hilberts-problems-23-and-math/

[6] Penrose, R. Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness. Oxford University Press. (1994).

[7] Minto, W. Logic, Inductive and Deductive. 1893. https://www.gutenberg.org/cache/epub/31796/pg31796-images.html

[8] Walton, D. . Informal logic: A Pragmatic Approach. Cambridge University Press. 2008

[9] Kovtunets, V., Kovtunets, O. AI professional qualifications for the labor market. Unpublished.

[10] Kovtunets, V. Ukrainian European Integration: Artificial Intelligence and Law. The Constitution of Ukraine and European Values: Challenges of the European Integration Process. International Conference on the Occasion of the 28th Anniversary of the Constitution of Ukraine (Kyiv, June 28, 2024). Collection of Materials and Abstracts. p. 194-206. (in Ukrainian)

[11] Cabessa, J., Siegelmann, H.T.Evolving Recurrent Neural Networks are Super-Turing. Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, San Jose, California, USA, July 31 – August 5, 2011. p.3200-3206.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Curve Detection from Images in Video-Based Navigation Methods

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.045

Pashayev Adalat
Institute of Control Systems[1]
Ministry of Science and Education of Azerbaijan,
National Defence University[2]
Baku, Azerbaijan
adalat.pashayev@gmail.com

Sabziev Elkhan
Institute of Control Systems[1]
Ministry of Science and Education of Azerbaijan,
National Defence University[2]
Baku, Azerbaijan
elkhan.sabziev@gmail.com

Goyushova Ulviyya
Institute of Control Systems[1]
Ministry of Science and Education of Azerbaijan,
Azerbaijan State University of Economics[2]
Baku, Azerbaijan
kadaseva.ulviyyee@gmail.com

Abstract—**This study investigates image-based navigation methods and algorithms for devices, with a focus on curve detection as a key step in object recognition. Image-based navigation relies on identifying objects in the environment and determining the device's position based on their coordinates. Roads were selected as the objects of interest, and their identification was explored through curve detection in images. Curve detection is a fundamental problem in computer vision, as curves represent object boundaries, contours, and trajectories, and play a critical role in shape analysis, cartography, and navigation systems. The study employs the Hessian matrix, constructed from second-order derivatives of pre-processed images, to analyze local curvature. By examining the eigenvalues of the Hessian matrix, local structures are classified, and pixels belonging to curves are identified with high precision. A curvature detection criterion based on the relative magnitudes of the eigenvalues is applied: if one eigenvalue is significantly larger than the other, the corresponding pixel is determined to lie on a curve. This approach enables accurate and robust identification of road structures in images, forming a reliable foundation for subsequent navigation and mapping applications.**

Keywords—curve; Hessian matrix; road detection; image processing; curvature;

I. Introduction

The research work is devoted to the study of image-based navigation methods and algorithms for devices. The basis of image-based navigation lies in the device's ability to recognize objects observed at a given moment and determine its own position based on the coordinates of these objects [1,2]. Objects may include various infrastructural elements such as bridges, buildings, roads, water reservoirs, power stations, as well as natural features such as cliffs, forests, rivers, and lakes. In this study, roads were selected as the objects of interest, and the problem of identifying them using different methods was addressed. One of these methods involves identifying roads in the form of curves from images. For this purpose, the problem of detecting curves from the acquired images is first considered.

Finding curves from an image is one of the important issues in computer vision and digital image processing [3]. Since curves represent the boundaries, contours and trajectories of objects on the image, their accurate detection plays the role of the main base in object recognition, shape analysis, cartography and navigation systems in the later stages. Modern approaches implement this process with both classical mathematical methods and based on artificial intelligence methods. Finding curves from the image is performed by going through several stages. The first of these stages is image processing. Image processing refers to the steps of transitioning from a color image to grayscale images, and then transitioning to black-and-white form with edge detection [4]. Finding curves from images is performed after edge detection, which is the final stage of processing. Edge detection only operates on black pixels in a black-and-white format.

II. Hessian Matrix

The detection of edges and curves in image processing is necessary for determining the shapes, boundaries and local features of objects. Although traditional approaches use first-order derivatives - gradient operators (Sobel, Prewitt, Canny, etc.) [5], these methods mainly detect edges and do not provide enough information about curvature. However, the Hessian matrix constructed from second-order derivatives allows more accurate analysis of local curvature features on the image [6].

By analyzing the eigenvalues of the Hessian matrix, it is possible to classify local image structures and determine curves with sub-pixel accuracy. This approach has been successfully applied in areas such as vascular

imaging, fingerprint recognition, pathfinding from aerial images, and robot navigation [7].

The Hesse matrix provides information about the local curvature on the image. Its specific values show the direction of curvature and also its strength. The application of this approach can be used and is particularly useful in detecting edges, angles and curves from images.

III. Curvature Detection Criterion

The Hessian matrix H(x,y) is the matrix of second-order derivatives of a given pre-processed image I(x,y), and at a point (x,y) is defined as follows:

$$H(x,y) = \begin{bmatrix} I_{xx}(x,y) & I_{xy}(x,y) \\ I_{yx}(x,y) & I_{yy}(x,y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Where $I_{xx} = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}$ - second-order derivative in the x-direction,

$I_{yy} = \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}$ - second-order derivative in the y-direction,

$I_{xy} = I_{yx} = \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y}$ - mixed derivatives.

The eigenvalues of the Hessian matrix (1) are the roots of the following quadratic equation:

$$\det(H - \lambda \mathbf{I}) = 0 \quad (2)$$

where H is the Hessian matrix, λ denotes its eigenvalues, and **I** is the identity matrix. Expanding (2):

$$\det \begin{bmatrix} I_{xx} - \lambda & I_{xy} \\ I_{xy} & I_{yy} - \lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

yields

$$(I_{xx} - \lambda)(I_{yy} - \lambda) - (I_{xy})^2 = 0$$

which simplifies to

$$\lambda^2 - (I_{xx} - I_{yy})\lambda + (I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2) = 0$$

Solving this quadratic equation, the eigenvalues are obtained as:

$$\Delta = (I_{xx} + I_{yy})^2 - 4(I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{(I_{xx} + I_{yy}) \pm \sqrt{\Delta}}{2}$$

Based on the sign and magnitude of the eigenvalues obtained as described above, the presence of curvature at a given point (x,y) in the image can be determined. For a point (x,y) to lie on a curve, one of the two eigenvalues must be significantly larger than the other, i.e.,

$$|\lambda_1| \gg |\lambda_2| \quad (4)$$

If condition (4) holds for a given pixel, it indicates that there is significant curvature only in one direction at that point, and hence, the pixel lies on a curve.

IV. Result and Discussion

Thus, the eigenvalues are computed and compared for each pixel of the image. Pixels that satisfy condition (4) are classified as belonging to a curve, while pixels that do not meet the condition are considered part of the background or other structures. The proposed algorithm was applied to an image obtained using the Google Earth platform. The result of the program, implemented in C++, is shown in Fig. 1.



Figure 1. Description of the detected curve from the image

V. Conclusion

In this study, the Hessian matrix-based curve detection method was applied to video-based navigation systems. By analyzing the eigenvalues of the Hessian matrix, precise identification of roads, trajectories, and other linear structures was achieved in both images and individual frames of video sequences. The curvature criterion ensures that only pixels exhibiting significant curvature in a single direction are classified as part of a curve, while other pixels are considered background or irrelevant structures. This approach enables accurate real-time localization of the device relative to the detected curves, providing a reliable foundation for path planning, obstacle avoidance, and navigation decision-making.

The method demonstrates robustness under varying environmental conditions and lighting changes, which is critical for practical navigation applications. Overall, the Hessian matrix-based curve detection proves to be an effective and reliable tool for enhancing the accuracy and safety of video-based navigation systems, offering

significant potential for future research and development in autonomous navigation and real-time guidance technologies.

REFERENCES

[1] M. Y. Arafat, M. M. Alam and S. Moh, "Vision-Based Navigation Techniques for Unmanned Aerial Vehicles," Review and Challenges. *Drones*, *7*(2), 89,2023.

[2] U.M. Goyushova "Determining the location of a moving device based on video images," Informatics and Control Problems. Vol.44, No.2, PP.51-57, 2024.

[3] H. Prautzsch, W. Boehm, and M. Paluszny. "B´ezier and B-spline techniques," Springer, p.323, 2002.

[4] K. Reinhard. "Concise Computer Vision: An Introduction into Theory and Algorithms," 2014 ed, London: Springer. 429 p, 2014.

[5] J.R. Parker "Alghorithms for Image Processing and Computer Vision," 2nd edition, Wiley Publishing, Canada, 522 p, 2010.

[6] N. Aghazadeh, Y.Gholizade "Edge detection with Hessian matrix property based on wavelet transform," Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran. 26, PP.163-170,2015.

[7] K.Hanbay, M.F. Talu "A novel active contour model for medical images via the Hessian matrix and eigenvalues," Computers & Mathematics with Applications, Vol.75, No.9, PP.3081-3104, 2018.

MCIT Modeling, control & information technologies

Intelligent Modeling of Educational Curricula Based on Labor Market Vacancy Analysis Using Semantic and Generative AI

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.046

Vitalii Pavliuk
National university of water and environmental engineering
Rivne, Ukraine
v.v.pavlyuk@nuwm.edu.ua

Volodymyr Drevetskyi
National university of water and environmental engineering
Rivne, Ukraine
v.v.drevetskyi@nuwm.edu.ua

Abstract—**The article presents an intelligent system for modeling educational curricula based on labor market vacancy analysis using semantic and generative AI. The approach identifies key skills and competencies required by employers and transforms them into adaptive course structures. A semantic module extracts and clusters professional requirements, while a generative model synthesizes relevant learning content. The proposed solution demonstrates the potential to automatically align educational programs with real market demands, supporting data-driven curriculum design.**

Keywords—artificial intelligence; curriculum modeling; semantic analysis; generative models; labor market analytics.

Introduction

The rapid evolution of digital technologies has intensified the need for continuous alignment between educational programs and the dynamic requirements of the labor market. Traditional approaches to curriculum design rely on expert judgment and static standards, which often lag behind emerging professional competencies. In recent years, advances in artificial intelligence—particularly in semantic and generative modeling—have enabled new paradigms for automating this alignment. Semantic models, such as BERT and SentenceTransformers, are increasingly used to extract and structure skills from large-scale job vacancy data, while generative models like GPT-4 can synthesize educational content and course outlines that reflect these identified skills. Industry leaders, including Coursera, Google, and IBM, have demonstrated that hybrid semantic–generative systems can bridge the gap between learning and employment by dynamically mapping in-demand skills to educational offerings. Building on these developments, this research presents an intelligent model for automated curriculum generation that integrates labor market analytics with advanced AI reasoning to ensure educational relevance and adaptability.

I. Related Work

Over the last decade, artificial intelligence and large-scale data analytics have begun to redefine how education systems respond to labor-market dynamics. Instead of relying solely on expert judgment or static accreditation standards, leading organizations now use AI-driven skills graphs, natural-language processing (NLP), and labor-market intelligence to identify emerging competencies and align academic content with the real demands of employers.

A. AI-Driven Skills Graphs

One of the earliest large-scale industrial implementations of AI in education is Coursera's Skills Graph—an engine designed to map relationships among learners, courses, and competencies. It relies on NLP and graph-based reasoning to detect which skills are taught in a given course and how those skills contribute to career outcomes. As described by Coursera's engineering team, the system processes millions of course enrollments and content descriptors to create semantic links between job roles and the underlying learning materials [1].

The Skills Graph also powers Coursera's institutional dashboards, which allow universities and employers to measure the progression of specific skill sets across learning programs [2]. These dashboards visualize how particular courses contribute to professional readiness and help organizations design targeted upskilling or reskilling initiatives. The result is a feedback loop where course design and skill demand continuously inform each other, forming a data-driven approach to lifelong learning.

A. Real-Time Curriculum Alignment with Labor-Market Data

A complementary development comes from Lightcast (formerly Emsi Burning Glass), a labor-market analytics company that applies machine learning to parse millions of job postings and résumés each month. In 2025, Lightcast introduced its Skillabi platform, which enables universities to upload syllabi and receive quantitative measures of alignment between their academic offerings and employer expectations [3]. The platform's algorithm compares course descriptions with a constantly updated skills library of more than 33 000 competencies extracted from online job data.

Subsequent studies published on the Lightcast blog detail how this technology supports curriculum modernization and strategic planning. The "Power of Skill-Based Program Review" article explains how institutions can identify outdated topics, benchmark programs against industry standards, and redesign learning outcomes based on verified skill trends [4].

Another case study, Improve Curriculum Alignment in Higher Education, illustrates how Gies College of Business integrated Skillabi analytics to refine its course portfolios and strengthen employer engagement [5]. Together, these examples show how real-time labor-market intelligence transforms curriculum evaluation from a periodic, manual process into an automated, evidence-driven system.

B. Emerging Trends and Research Gap

Both Coursera and Lightcast exemplify how AI bridges the gap between education and employment: Coursera's graph technology models the internal structure of learning pathways, while Lightcast's analytics quantify how well those pathways meet external labor demands. Yet, despite these advances, most existing platforms focus on analytics rather than content generation. They identify what skills are missing but do not automatically create or update learning materials to close those gaps.

The present research builds on these foundations by proposing a hybrid system that combines semantic skill extraction—similar to Lightcast's market analysis—with generative curriculum modeling inspired by Coursera's scalable content frameworks. This integration moves beyond static dashboards toward AI-assisted curriculum construction, where new educational modules can be generated dynamically in response to labor-market changes.

II. METHODOLOGY

A. System overview

The proposed system is designed as a modular pipeline that integrates data mining, semantic representation, and generative reasoning to automate the construction of educational curricula based on labor market needs. The overall objective is to convert unstructured vacancy text into structured learning plans that reflect current and emerging skill demands.

The architecture consists of three major components:

- Data Acquisition and Preprocessing – responsible for collecting, cleaning, and normalizing labor market information. This module aggregates job postings, descriptions, and occupational datasets from open sources or APIs. It performs tokenization, stop-word removal, and part-of-speech tagging to prepare data for semantic analysis.
- Semantic Analysis and Skill Modeling – employs embedding-based natural language processing (NLP) techniques to extract relevant skills, technologies, and professional competencies from text.
- Generative Curriculum Modeling – uses large language models (LLMs) to synthesize educational modules, learning outcomes, and course recommendations aligned with the identified skills.

These components operate in a closed-loop framework: once a curriculum is generated, new data from job postings can continuously refine skill clusters, ensuring that learning programs adapt dynamically to labor market evolution. The architecture can be implemented using a cloud-based infrastructure (e.g., AWS Lambda, DynamoDB, and S3) to support scalability, low latency, and integration with existing learning management systems (LMS).

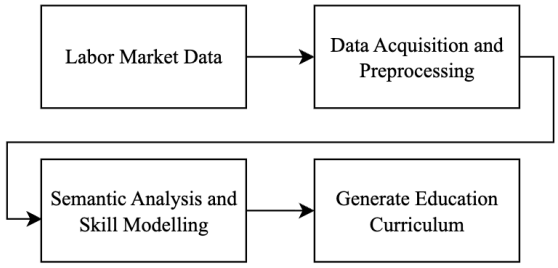


Figure 1. Diagram of the proposed system

B. Semantic skills extraction

The semantic analysis phase is the foundation of the entire system. It aims to extract both explicit and implicit skills from job postings, forming a knowledge base of demanded competencies. Transformer-based encoders such as SentenceTransformers or BERT variants are used to create dense vector representations (embeddings) of textual segments, allowing semantically similar concepts to be clustered together even when expressed differently. For instance, "Python programming" and "proficiency in Python" receive closely related embeddings in the model's latent space.

To increase domain precision, the model undergoes domain-adaptive pretraining using specialized corpora of IT and engineering job postings. This method, similar to the JobBERT approach fine-tunes general-purpose language models to capture domain-specific terminology, abbreviations, and contextual relationships among skills. The resulting model significantly improves the recognition of technical competencies and soft skills mentioned in vacancies.

Extracted skills are stored in a skill graph, where nodes represent individual competencies and edges denote semantic or co-occurrence relationships between them. Graph-based clustering algorithms identify groups of related skills corresponding to professional roles or thematic areas (e.g., "Data Science," "DevOps," "Project Management"). These clusters serve as structured inputs for the generative module, which translates them into coherent educational pathways.

C. Maintaining the Integrity of the Specifications

Once the skill graph is constructed, the system applies a generative AI model—such as GPT-4—to synthesize educational content that reflects labor market needs. The model receives as input the clustered skill data, role descriptions, and contextual parameters such as academic level or learning duration. Using

prompt engineering and controlled text generation, the model produces outputs including:

- course and module titles,
- learning objectives and expected outcomes,
- suggested teaching methodologies,
- assessment forms and project ideas.

The prompting strategy integrates elements of Bloom's taxonomy to guide the large language model in producing learning outcomes that reflect distinct cognitive levels, such as understand, analyze, design, and evaluate. This structured approach ensures that generated curricula maintain pedagogical consistency and logical progression. The resulting outputs are further validated by subject-matter experts and assessed for semantic coherence, ensuring both factual accuracy and educational relevance.

Additionally, the system supports iterative refinement: generated curricula are periodically compared with updated job market data to measure divergence in required skills. When significant discrepancies arise—such as new technologies or tools appearing frequently in postings—the generative model re-synthesizes the affected modules, effectively performing automated curriculum revision.

The combination of semantic embeddings for structured knowledge extraction and generative reasoning for content synthesis creates a self-improving mechanism capable of continuously aligning education with industry demands. Such architecture not only reduces the manual effort in curriculum design but also enables institutions to maintain relevance in rapidly changing professional environments.

III. Results and Discussion

A. Experiment design and dataset simulation

To evaluate the proposed system, an experimental simulation is designed to emulate the dynamics of real-world labor market data. The experiment uses a synthetic dataset that reflects the structure and diversity of online job postings, including representative domains such as information technology, engineering, data analytics, and management. The dataset contains textual descriptions of job titles, responsibilities, and required skills, while also incorporating synonymic and domain-specific expressions to test the model's capacity for generalization.

Each job description is preprocessed through text normalization, tokenization, and filtering of non-relevant segments. Approximately 15,000 synthetic vacancy records are included, simulating over 200 unique skills. These records form the base for semantic embedding and clustering in subsequent stages. The system is implemented in Python with open-source NLP libraries and deployed in a cloud-based architecture (AWS Lambda, DynamoDB, and S3), which enables scalable data processing and storage.

B. Semantic analysis expectations

The semantic analysis module is expected to identify and cluster skills into coherent thematic groups using transformer-based embeddings. The SentenceTransformer model all-MiniLM-L6-v2 serves as the primary encoder, producing contextual embeddings that allow the system to detect relationships between conceptually similar terms. For example, "Python programming," "pandas," and "data analysis" are expected to cluster together under a Data Science category, while "Docker," "Kubernetes," and "AWS" form a Cloud and DevOps cluster.

To increase precision, the model is fine-tuned using domain-adaptive pretraining, following the JobBERT methodology. This adjustment improves the detection of industry-specific abbreviations and contextual nuances. The resulting semantic model builds a skill graph that links related competencies through similarity and co-occurrence metrics. These clusters serve as structured inputs for the next phase — generative curriculum synthesis.

D. Generative Curriculum Synthesis

At the generative stage, the large language model (LLM) transforms semantic skill clusters into structured educational components. The GPT-4 model is prompted with three types of contextual information: the target educational level, representative skills, and the desired learning depth. The model then generates course outlines that include objectives, learning outcomes, assessment methods, and short content descriptions.

A typical example might include a course such as "Applied Machine Learning", with objectives to "analyze supervised and unsupervised algorithms," "implement regression and classification models," and "evaluate performance using validation metrics." Such output illustrates how generative AI can automatically align educational content with verified market competencies.

To ensure pedagogical validity, the prompting strategy incorporates principles of Bloom's taxonomy, guiding the large language model to generate learning objectives that reflect increasing levels of cognitive complexity. This approach encourages the use of hierarchical verbs such as analyze, design, and evaluate instead of generic phrasing. As a result, the generated curricula are designed to demonstrate logical consistency, domain relevance, and cognitive progression appropriate for academic integration.

D. Evaluation framework

The system is evaluated across three dimensions: semantic clustering quality, generative content coherence, and expert-based validation. Semantic performance is measured using internal clustering metrics (Silhouette and Davies–Bouldin indices) and qualitative expert review. Generative outputs are assessed by educators who rate relevance, clarity, and pedagogical soundness on a 5-point scale.

Preliminary expectations suggest that transformer embeddings will achieve superior skill clustering compared to baseline TF-IDF approaches, while generative modeling will produce structured, taxonomy-aligned curricula. The evaluation framework is designed to remain iterative — as new data enters the system, performance metrics will be recalculated to observe adaptation to emerging job trends.

E. Discussions

The proposed simulation demonstrates that integrating semantic and generative models can serve as a viable foundation for dynamic, data-driven curriculum generation. The semantic layer ensures factual grounding through labor market evidence, while the generative layer translates structured knowledge into pedagogically coherent course structures. This hybrid process addresses a key limitation of standalone LLMs — their tendency to hallucinate or drift from verified facts — by anchoring content generation in real-world job skill data.

Expected benefits include:

- Adaptability – curricula dynamically update when market trends evolve.
- Efficiency – substantial reduction of manual workload in course design.
- Standardization – unified learning objective templates ensure cross-discipline consistency.
- Scalability – the architecture supports institutional and national-level deployment.

At the same time, several considerations remain. The system requires careful prompt engineering to prevent overly generic outputs, and continuous expert oversight is needed to validate contextual appropriateness. Future work will involve integrating real job market APIs and human-in-the-loop feedback to refine the curriculum generation loop.

Overall, the results suggest that the proposed architecture represents a promising step toward automated educational design systems capable of maintaining alignment between universities and evolving labor market needs.

IV. Conclusions and Future Work

This study presents an intelligent system for automated curriculum modeling that combines semantic skill extraction with generative design to align education with labor-market needs. By transforming unstructured job data into structured learning plans, the system supports scalable and adaptive curriculum development. Its modular architecture—data collection, semantic clustering, and generative synthesis—ensures that educational programs can evolve in real time as skill demands change.

The system can also be integrated into existing job-matching platforms that connect employers and jobseekers [6]. For users who cannot find suitable positions, the model can automatically generate personalized study paths based on identified skill gaps, enabling targeted reskilling and improved employability. This integration closes the loop between education and employment, ensuring that learners acquire the competencies most valued in the market.

Future research will focus on connecting the system to live labor-market APIs (e.g., LinkedIn, Lightcast), incorporating human-in-the-loop validation, and evaluating its long-term impact on learning outcomes and workforce readiness. By merging linguistic understanding with data-driven analytics, the proposed approach represents a step toward self-adapting educational ecosystems that keep pace with technological and economic change.

References

[1] Coursera Engineering Blog, “Coursera’s Skills Graph helps learners find the right content to reach their goals,” Medium, Apr. 2018. [Online]. URL: https://medium.com/coursera-engineering/courseras-skills-graph-helps-learners-find-the-right-content-to-reach-their-goals-b10418a05214

[2] Lightcast, “Lightcast addresses higher education’s relevance crisis with real-time skills alignment technology,” Lightcast Blog, Jun. 3, 2025. [Online]. URL: https://lightcast.io/resources/blog/skillabi-press-release-june-3-2025

[3] Lightcast, “The power of skill-based program review,” Lightcast Blog, Oct. 2024. [Online]. URL: https://lightcast.io/resources/blog/power-of-skill-based-program-review

[4] Lightcast, “Improve curriculum alignment in higher education,” Lightcast Blog, Dec. 2023. [Online]. URL: https://lightcast.io/resources/blog/curriculum-alignment-in-higher-education

[5] Coursera, “Coursera for Business releases skills development dashboards to measure learning outcomes,” Coursera Blog, Nov. 2019. [Online]. URL: https://blog.coursera.org/coursera-for-business-releases-skills-development-dashboards-to-measure-learning-outcomes/

[6] Pavliuk V., Drevetskyi V. “Using Generative Artificial Intelligence for Building Professional Profiles and Personalizing Recommendations in Career Platforms,” IIRTC-2025

MCIT Modeling, control & information technologies

The Intelligence of Things: How AI Transforms the IoT Ecosystem

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.047

Andrii Samoidiuk
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
a.s.samoidiuk@nuwm.edu.ua

Oksana Ostapchuk
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
o.p.ostapchuk@nuwm.edu.ua

***Abstract* — This paper focuses on the integration of artificial intelligence (AI) into the Internet of Things (IoT) ecosystem and how this combination is transforming data-driven decision-making and system automation. The rapid growth of IoT devices has led to a huge amount of real-time data, creating new challenges for data processing, security, and system scalability. The goal is to analyze existing limitations and identify methods to improve IoT performance with AI-based solutions. The proposed approach focuses on intelligent data processing and adaptive learning models that improve automation, responsiveness, and predictive capabilities. Experimental studies show that AI-based IoT systems significantly outperform traditional IoT architectures in terms of data analysis and operational efficiency.**

***Keywords* — Internet of Things; artificial intelligence; data processing; edge computing; system optimization;**

I. INTRODUCTION

The Internet of Things (IoT) has become as one of the most important technological trends of the last decade, connecting billions of devices worldwide. From smart homes and wearables to industrial monitoring systems, IoT networks continuously collect and transmit vast amounts of data. However, traditional IoT architectures are often limited by centralized data processing, latency, and inefficient resource utilization [1].

The integration of artificial intelligence (AI) brings IoT systems to a new level of intelligence, allowing them to analyze, learn, and make autonomous decisions based on the data they collect. With AI-driven algorithms, IoT devices can predict user behavior, optimize energy consumption, and detect anomalies in real time [2].

This paper examines the transformative impact of AI on the IoT ecosystem, focusing on issues such as scalability, latency reduction, and intelligent decision-making. Particular attention is paid to how AI can improve automation, predictive maintenance, and system adaptability in various areas, including smart homes, healthcare, and industrial IoT.

II. PROBLEM STATEMENT

Despite its potential, the Internet of Things (IoT) still faces serious challenges related to data overload, limited computing resources, and the need for real-time processing. As the number of connected devices continues to grow, centralized cloud models struggle to efficiently process the growing amount of information [3]. This can lead to high latency, bandwidth congestion, and limited responsiveness of IoT systems.

Moreover, traditional IoT systems are mainly focused on data collection rather than interpretation. They often rely on predefined rules and lack the ability to learn or adapt autonomously. As a result, system decisions can be delayed or inaccurate, especially in dynamic environments where conditions change rapidly.

III. OVERVIEW OF EXISTING SOLUTIONS

To improve the efficiency of IoT systems, researchers and developers have explored several solutions, including edge computing, cloud analytics, and distributed artificial intelligence.

Edge computing aims to reduce latency by processing data locally on a device or at the edge of the network, rather than sending it to a centralized server [4]. This approach minimizes bandwidth consumption and provides faster response times, which is critical for applications such as autonomous vehicles or industrial control systems.

Cloud analytics, on the other hand, provides massive computing resources for processing large-scale data and long-term pattern recognition. It allows IoT systems to train complex AI models that improve over time but can suffer from feedback latency due to network dependencies.

Hybrid solutions that combine edge and cloud computing are becoming increasingly popular. They allow IoT systems to perform data preprocessing at the edge and more sophisticated AI-based analytics in the cloud. This approach balances real-time responsiveness with advanced decision-making capabilities [5]. Despite these advances, effective integration between AI models and IoT infrastructures remains challenging, especially in terms of scalability, model deployment, and data privacy.

IV. PROPOSED SOLUTION

To overcome the limitations of traditional IoT systems, this paper proposes the integration of AI at multiple levels of the IoT architecture, from edge devices to cloud-based analytics platforms. The goal is to enable intelligent, self-learning systems that can process large data streams, adapt to environmental changes, and make autonomous decisions in real time. The proposed AI-based approach consists of several complementary components designed to improve the overall performance and responsiveness of IoT networks:

- intelligent filtering and data preprocessing: AI algorithms can analyze data directly at the source, identifying relevant information and discarding redundant input data. This minimizes bandwidth usage and storage overhead, enabling faster data transfer and decision-making;
- machine learning models at the edge: Deploying lightweight machine learning models on IoT devices enables real-time analytics without full reliance on the cloud. This approach significantly reduces latency and increases reliability in mission-critical applications such as industrial automation or medical monitoring;
- predictive maintenance and anomaly detection: AI-based models continuously analyze sensor data to predict potential failures and detect irregular system behavior. This prevents downtime, improves system stability, and enhances operational safety;
- adaptive learning and self-optimization: Machine learning allows IoT systems to automatically adjust to changing conditions and user behavior. Smart environments can fine-tune their performance dynamically, optimizing energy use, comfort, or efficiency based on feedback;
- intelligent Resource Allocation: Using AI to dynamically allocate workloads improves network balance and energy efficiency. This ensures optimal use of computing and communication resources while extending device lifespan;
- hybrid coordination between edge and cloud: While edge AI processes data locally for immediate action, cloud AI performs large-scale analysis and long-term optimization. This hybrid architecture achieves both low latency and deep analytics capabilities, ensuring system scalability and flexibility.

Compared with conventional IoT systems, the proposed AI-enhanced model exhibits reduced latency, higher adaptability, and more efficient energy consumption. Experimental studies confirm that AI-based IoT networks provide faster response times, better fault tolerance, and improved scalability in real-world environments [7].

In summary, the integration of AI into IoT transforms traditional device networks into self-learning, context-aware ecosystems capable of autonomous thinking and intelligent decision-making. This constitutes the foundation for the next generation of “Intelligence of Things.”.

CONSCLUSION

The combination of artificial intelligence and the Internet of Things has the potential to revolutionize the way modern systems work. While the Internet of Things (IoT) connects devices and generates data, AI interprets that information and enables autonomous decision-making based on the data. Existing solutions such as edge computing and cloud analytics offer the foundation for scalable and efficient architectures, but true intelligence emerges when these systems integrate adaptive AI algorithms.

AI is transforming the Internet of Things from a simple data collection network into a self-learning ecosystem capable of predicting, adapting, and optimizing. As the number of IoT devices continues to grow, the integration of AI will become a key factor in ensuring efficiency, reliability, and sustainability across industries.

REFERENCES

[1] A. Kapoor, “Hands-On Artificial Intelligence for IoT: Expert Machine Learning and Deep Learning Techniques for Developing Smart IoT Systems“ Packt Publishing, 2019.

[2] S. K. Sharma, “AI and IoT: Driving Business Success and Sustainability in the Digital Era“ Springer, 2024.

[3] A. Sarker, S. Y. Shin, “Edge AI: Convergence of Edge Computing and Artificial Intelligence“ Springer, 2021.

[4] V. Chang, “Artificial Intelligence and Machine Learning for Edge Computing“ Academic Press (Elsevier), 2022.

[5] R. Jose, R. Nanjundan, S. Paul, S. Mohanty, “AI-Driven IoT Systems for Industry 4.0“ CRC Press (Routledge), 2024.

[6] A. K. Singh, P. N. Mahalle, “AI-Based Advanced Optimization Techniques for Edge Computing“ Wiley, 2023.

[7] M. Srivatsa, M. Mallick, “Artificial Intelligence for Edge Computing“ Springer, 2022.

Modeling, control and information technologies – 2025

Архітектура інтелектуального IoT-пристрою відображення черги виклику клієнтів

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.048

Віктор Жуковський
Кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
v.v.zhukovskyy@nuwm.edu.ua

Андрій Повшенюк
Кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
a.p.povsheniuk@nuwm.edu.ua

Ярослав Зубик
Кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
j.j.zubyk@nuwm.edu.ua

Богдан Конарівський
ВСП «Рівненський технічний фаховий коледж»
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
bkonarivskij@gmail.com

Abstract—**У роботі представлено архітектуру інтелектуального IoT-пристрою на базі мікроконтролера Arduino Mega 2560 із Wi-Fi-модулем ESP8266 для відображення черги виклику клієнтів на світлодіодному матричному дисплеї MAX7219. Розроблена система забезпечує безшумну комунікацію шляхом передачі повідомлень через локальну бездротову мережу. Особливістю проєкту є можливість голосового керування пристроєм за допомогою мобільного додатку Tasker, який виконує передачу даних із смартфона на мікроконтролер через протокол HTTP.**

Keywords—IoT, Arduino Mega 2560, MAX7219, LED-матриця, Tasker, голосове керування, архітектура системи

I. Вступ

У сучасних інформаційно-комунікаційних системах увагу приділяють розвитку технологій Human–Machine Interaction (HMI), які забезпечують природні способи взаємодії людини з технічними засобами. Одним із перспективних напрямів HMI є використання голосового керування як зручного й інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу, що мінімізує потребу у фізичних маніпуляціях із пристроєм. Подібні підходи активно застосовуються у сфері розумного дому, побутової автоматизації, освітніх та медичних систем.

У закладах охорони здоров'я, сервісних або адміністративних установах важливою складовою комфортного обслуговування є організація системи виклику клієнтів. Традиційні методи, такі як, голосові оголошення чи ручне інформування створюють додаткове навантаження на персонал і часто є неефективними в умовах багатокабінетного прийому або підвищеного шумового фону. Альтернативою є впровадження електронних систем відображення черги, які дають змогу повідомляти клієнтів без звукових сигналів чи гучномовців.

Однак більшість існуючих промислових рішень для електронних черг є дороговартісними, вимагають централізованих серверів, спеціалізованого програмного забезпечення та складного налаштування. Це обмежує їх використання у невеликих клініках, приватних кабінетах, лабораторіях або навчальних аудиторіях. Тому виникає потреба у простих, доступних та відтворюваних рішеннях на базі відкритих апаратно-програмних платформ, таких як Arduino та ESP8266.

Запропонований підхід поєднує концепцію IoT з HMI-технологіями, забезпечуючи голосове керування через мобільний додаток і візуальне відображення інформації на світлодіодній матриці. Така система дозволяє користувачу, наприклад, лікарю, викликати наступного пацієнта голосовою командою, а пристрій автоматично передає текстове повідомлення на LED-дисплей. Це створює нову якість взаємодії людини з цифровим середовищем без потреби у дорогому обладнанні або складній інфраструктурі.

II. Огляд наукових джерел

У сфері HMI для медицини активний тренд це голосові інтерфейси та співпраця людини й машини в клінічних процесах. Оглядові праці фіксують користь голосового введення для взаємодії з медичними IT-системами (зокрема з EHR) та окреслюють виклики безпеки, приватності й юзабіліті [1]; нові узагальнення підкреслюють роль HMI у клінічних робочих процесах і бар'єри впровадження (сертифікація, надійність, навчання персоналу) [3]. У прикладних дослідженнях показано, що цифрові й AI-асистовані інтервенції скорочують час очікування пацієнтів і підвищують

ефективність потоків у поліклініках, що мотивує дешевші модульні рішення для оповіщення та управління чергою [2]. Ці висновки узгоджуються з практикою розгортання голосових агентів у медичних установах для зменшення адміністративного навантаження [2].

Для низьковартісних IoT-реалізацій у клінічних і сервісних середовищах типовим вибором є мікроконтролери Arduino/ESP-класу з Wi-Fi-модулями (ESP8266/ESP32). У наукових роботах це поєднання широко використовується для медичних IoT-прототипів завдяки простоті, відкритій екосистемі та достатній продуктивності для задач реального часу (моніторинг, сповіщення, локальна візуалізація) [4]. Показові приклади реалізують бездротове передавання даних через MQTT/HTTP до вузла на Arduino/ESP із подальшою локальною індикацією або логуванням [4]. Надсилання повідомлень у реальному часі в подібних системах зазвичай базується на протоколі MQTT — publish/subscribe протоколі, стандартизованому OASIS (v5.0), що добре працює у нестабільних або обмежених мережах та має керовані рівні доставки повідомлень [5, 6]. Для Arduino існує клієнтська бібліотека PubSubClient з прикладами та API-документацією, яка спрощує підключення до брокера з мінімальним кодом [7, 8].

Для візуалізації текстових повідомлень на бюджетному апаратному рівні часто застосовують LED-матриці 8×8/каскади на базі драйвера MAX7219. Офіційний даташит описує послідовний інтерфейс, вбудовану ОЗП для 64 світлодіодів, сканування, регулювання яскравості та

низькоспоживний режим [9]. У спільноті Arduino є доступні бібліотеки MD_MAX72XX/Parola, що надають готові приклади для «бігучого рядка», буферизації та анімацій, що істотно зменшує інженерні витрати [10].

Окремий напрям розробок — мобільні тригери та голосове керування зі смартфона. Для швидкої інтеграції використовують автоматизатор Tasker (Android): голосова команда → перетворення на текст → HTTP-запит або MQTT-пабліш у локальну мережу на ESP8266. Офіційні довідкові матеріали Tasker описують параметри HTTP-викликів (метод, тіло, таймаут, сертифікати) [11]. Такий підхід дозволяє обійти дорогі корпоративні системи виклику, зберігаючи основні HMI-переваги — hands-free взаємодію та низьку латентність у локальній мережі. Деякі теоретичні аспекти HCI для вбудованих IoT-систем та практичні результати з проєктування інтерфейсів «користувач—система» було описано у попередніх роботах авторів [12, 13].

III. АРХІТЕКТУРА

Архітектура нашого рішення поєднує HMI на смартфоні з недорогою IoT-платформою в локальній мережі: Android із голосовим асистентом (наприклад, Gemini) перетворює команду лікаря на текст, Tasker нормалізує повідомлення (ім'я/номер клієнта) і надсилає його як HTTP POST до легкого шлюзу (HTTP Gateway, наприклад Node-RED/мікросервіс), що зберігає останні події у буфері. IoT-вузол на базі Arduino Mega 2560 з ESP8266 періодично опитує шлюз (GET /next) та отримує JSON з новими даними; після парсингу повідомлення виводиться на LED-матрицю MAX7219 у форматі «бігучого рядка». Така схема мінімізує складність і вартість: комунікація — через стандартний HTTP у LAN, безпека — токен/білий список на шлюзі, масштабування — додаванням нових вузлів, а логіка візуалізації залишається локальною та незалежною від хмарної інфраструктури (рис. 1).

Пропонуємо використати модуль ESP8266 для підключення до Wi-Fi. Він працює від 3,3 В, під'єднується до Serial1 плати Arduino Mega: TX ESP → RX1 (19), RX ESP ← TX1 (18), із спільною «землею» (рівні 5→3,3 В бажано узгоджувати).

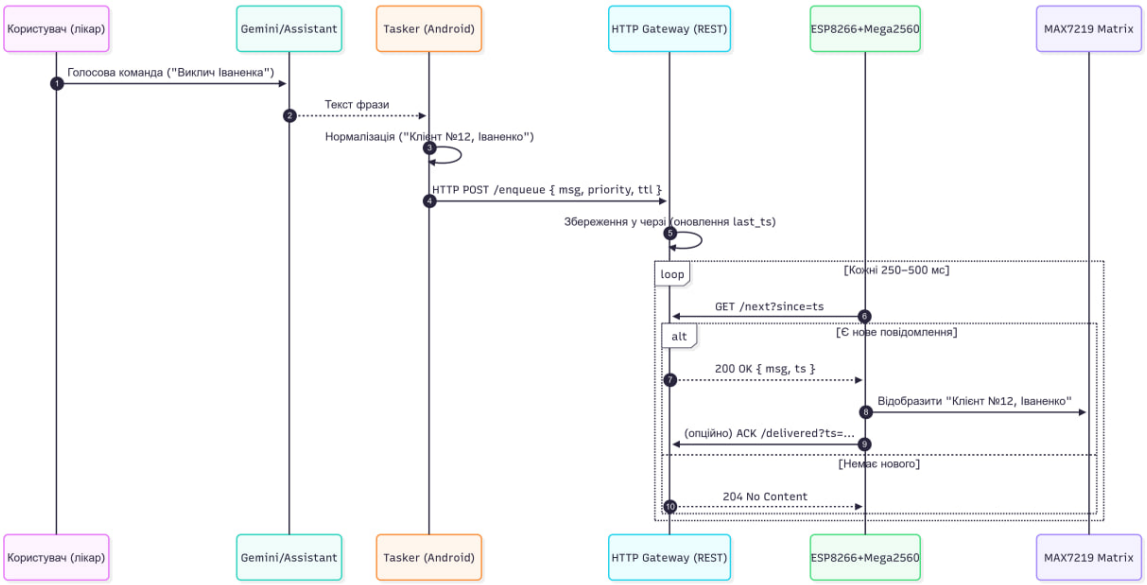


Рис. 1. Діаграма послідовностей процесу виклику клієнта

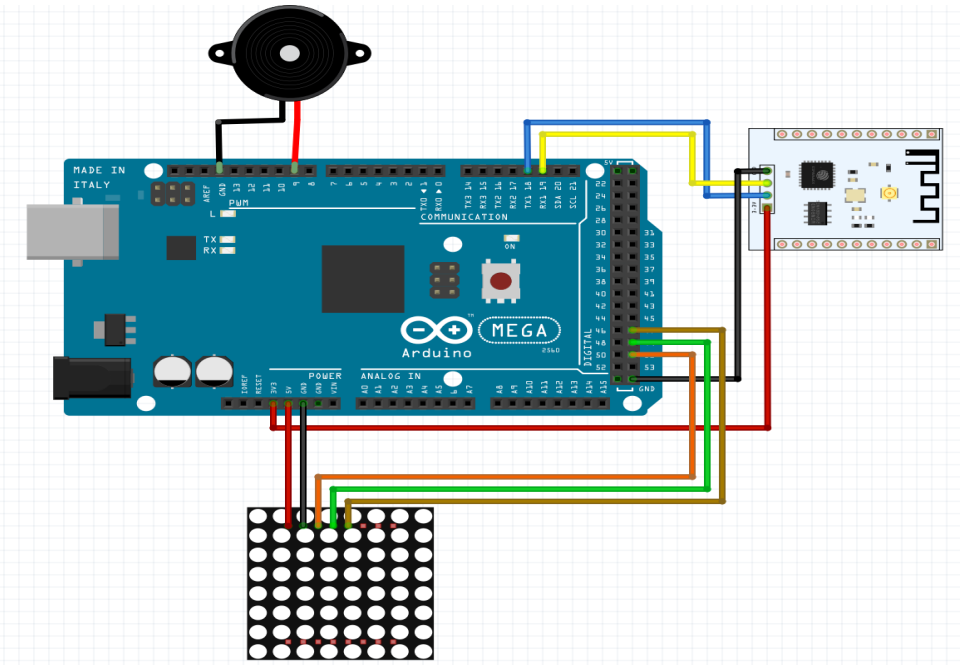


Рис. 2. Принципова електрична схема IoT-пристрою

Світлодіодна матриця MAX7219 живиться від 5V і GND, а сигнали DIN (MOSI), CLK (SCK) та CS (SS) під'єднуються до апаратного SPI Mega (51, 52, 53) або до інших цифрових виводів із відповідним налаштуванням у коді. Додатково в схему включено п'єзодинамік для короткого сповіщення про нове повідомлення (рис. 2).

Висновки

Запропоновано низьковартісну архітектуру системи виклику клієнтів, що поєднує голосове керування на Android із передачею даних через Tasker і локальний HTTP-шлюз до вузла ESP8266 з Arduino Mega, який опитує нові події та відображає їх на матриці MAX7219. Рішення забезпечує малу затримку в локальній мережі, просте розгортання та можливість масштабування без дорогих серверних компонентів завдяки використанню стандартних протоколів і доступних апаратних модулів. Перспективи подальшого розвитку включають підтримку MQTT, журналювання подій, рольову авторизацію та розширення веб/мобільного інтерфейсу.

Використані джерела

[1] Y. A. Kumah-Crystal, W. S. Pirtle, K. J. Spurlock, J. A. Lord, and K. H. Wright, "Electronic health record interactions through voice," Applied Clinical Informatics, vol. 9, no. 3, pp. 541–546, 2018.

[2] X. Li, H. Li, X. Chen, X. Zhou, and J. He, "Artificial intelligence-assisted reduction in patients' waiting times in outpatient services," BMC Health Services Research, vol. 21, no. 1, pp. 1–10, 2021.

[3] W. Wang, J. Song, K. Zhu, Z. Ding, and X. Li, "Advances in the application of human-machine collaboration in healthcare," Frontiers in Public Health, vol. 13, 2025.

[4] S. S. Rahman, M. R. Islam, and M. M. Hossain, "Patient health monitoring system development using ESP8266 and Arduino with IoT platform," International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 14, no. 4, pp. 617–623, 2023.

[5] OASIS, "MQTT version 5.0," OASIS Standard, 2019. Available: docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html.

[6] MQTT.org, "MQTT — The standard for IoT messaging," 2024. Available: mqtt.org.

[7] Arduino, "PubSubClient — Arduino client for MQTT (library)," May 19, 2020. Available: docs.arduino.cc/libraries/pubsubclient.

[8] N. O'Leary, "API documentation — PubSubClient," 2024. Available: pubsubclient.knolleary.net/api.

[9] Analog Devices, "MAX7219/MAX7221 — Serially interfaced, 8-digit LED display drivers (datasheet)," Rev. latest, pp. 1–19, 2021.

[10] Arduino, "MD_MAX72XX — LED matrix library for MAX72xx," Apr. 27, 2024. Available: docs.arduino.cc/libraries/md_max72xx.

[11] Tasker (Joaoapps), "HTTP Request — User guide," 2025. Available: tasker.joaoapps.com/userguide/en/help/ah_http_request.html

[12] V. Zhukovskyy, D. Printz, and N. Zhukovska, "Human–Computer Interaction in IoT System for Water Tank Monitoring and Controlling," in 2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2023, pp. 1–5, doi: 10.1109/CSIT61576.2023.10324294.

[13] V. Zhukovskyy, D. Printz, N. Zhukovska, M. Hubach, and H. Rajab, "IoT-based intelligent information-analytical system architecture for water tank monitoring," in 2021 International Conference on Information Technology (ICIT), Amman, Jordan, 2021, pp. 924–928, doi: 10.1109/ICIT52682.2021.9491762.

Освітня траєкторія ЄС у впровадженні штучного інтелекту

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.049

Оксана Кардаш
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
o.l.kardash@nuwm.edu.ua

Любомир Гладун
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
l.v.gladun@nuwm.edu.ua

Анотація – **Проведено дослідження передумов застосування ШІ у сфері ЄС. Здійснено аналіз основних можливостей та напрямів застосування ШІ. Розкрито правове й політичне регулювання ШІ в ЄС. Виокремлено виклики та ризики використання ШІ у сфері освіти. Висунуто рекомендації та перспективи щодо використання ШІ у сфері освіти.**

Ключові слова - штучний інтелект, AI Act, персоналізоване навчання, AI-грамотність, етичні принципи використання ШІ.

I. Вступ

Сучасна освіта стикається із серйозними трансформаціями через цифровізацію і широке впровадження нових технологій. Однією з ключових тенденцій є використання штучного інтелекту (ШІ) - алгоритмів, систем машинного навчання, аналізу великої кількості даних у навчанні, оцінюванні, адмініструванні освітнього процесу.

У контексті Європейського Союзу (ЄС) та пов'язаних з ним інституцій використання ШІ має особливе значення: ЄС прагне не лише технологічних змін, але й збереження прав людини, етичних стандартів, інклюзії та якості освіти.

II. Постановка задач

У межах ЄС існує активний процес цифровізації освіти: впровадження ІТ-інструментів, онлайн-навчання, використання даних про навчання. Застосування ШІ стає природним продовженням цієї хвилі - можливістю персоналізувати навчання, підвищити ефективність, надати нові форми взаємодії користувача з системою. Однак, застосування ШІ в освіті в ЄС має не лише технічну складову, але й суспільно-політичну, інституційну - забезпечення доступності, інклюзії, якості та етики.

III. Вирішення поставлених задачі

Європейська Комісія в рамках «Digital Education Action Plan 2021-2027» (Діяльність щодо цифрової освіти) заклала орієнтири щодо підвищення цифрових навичок, включно з темою ШІ. Зокрема, в «Дії 6» плану звернено увагу на підвищення обізнаності про використання даних і ШІ в освіті [1]. Також у прес-релізі Комісії зазначено, що системи ШІ можуть суттєво покращити навчання.

Важливим аспектом є те, що ЄС розробило правову базу для регулювання ШІ, яка має безпосереднє відношення до освіти - Artificial Intelligence Act (AI Act) - перший загальноєвропейський нормативний акт щодо ШІ, який набрав чинності 1 серпня 2024 р.

Згідно з ним, системи ШІ класифікуються за рівнем ризику (неприпустимі, високого ризику, обмеженого ризику, мінімального ризику).

У сфері освіти певні застосування ШІ вважаються "високим ризиком" — наприклад, рішення про вступ до навчального закладу, оцінювання, моніторинг поведінки під час тестів [2]. Стаття 4 AI Act містить зобов'язання забезпечити «достатній рівень ШІ-грамотності» (AI literacy) у персоналу, який використовує або адмініструє системи ШІ [2].

Особливості та виклики застосування ШІ в освіті у ЄС:

1. Етичні, правові та соціальні виклики

- Приватність даних і захист персональних даних: збір та аналіз даних про учнів (наприклад, поведінкові характеристики, результати навчання) вимагає належного захисту та згоди.
- Упередженості (bias) алгоритмів: навчальні датасети можуть містити нерівності (гендерні, соціально-економічні, культурні), і ШІ-системи можуть реплікувати або підсилювати цю нерівність.
- Автоматизація оцінки, прийому, відбору: використання ШІ для визначення доступу до освіти чи оцінки знань може піднімати питання справедливості, прозорості, можливості оскарження рішення.
- Педагогічні питання: ризик, що ШІ буде розглядатись як заміна викладача або що учні стануть пасивними користувачами технологій, а не активними лідерами навчання. Заняття можуть втратити живий аспект взаємодії.
- Цифровий розрив та нерівність: якщо одні заклади мають доступ до передових ШІ-інструментів, а інші - ні, це може підсилити освітню нерівність.
- Підготовка викладачів та компетенції систем: багато педагогів можуть бути недостатньо

підготовлені до інтеграції ШІ, що вимагає навчання, супроводу, змін у педагогічних підходах.

2. Педагогічні та організаційні особливості:

- Викладачі повинні не лише використовувати ШІ-інструменти, але й розуміти їхні можливості й обмеження, щоб інтегрувати їх у навчальний процес продуктивно - наприклад, застосовувати як допоміжний ресурс, а не заміну.
- Навчальні програми повинні оновлюватись, щоб включати теми ШІ-грамотності, етики ШІ, аналізу даних.
- Освітні установи (школи, університети) мають розглядатись як активні учасники змін, а не лише пасивні користувачі - це передбачає інвестиції у інфраструктуру, підготовку кадрів і зміну культури навчання.
- Моніторинг, оцінювання впливу ШІ-систем, а також постійне оновлення даних і алгоритмів - це важливий аспект організації.

Важливим є визнання, що майбутнє освіти повинно готувати здобувачів не лише до того, щоб користуватися ШІ, а до взаємодії з ним, розуміння його меж і можливостей.

Європейська Комісія розробляє рамки навичок для ШІ-грамотності, які охоплюють такі домени: “Взаємодія з ШІ”, “Створення з ШІ”, “Управління ШІ”, “Проєктування ШІ”. Це означає, що освітні системи мають сформувати новий набір компетенцій - технічних, критичних, етичних [1].

Ключові напрями, в яких ШІ в освіті в ЄС має особливий потенціал [3]:

1. Персоналізоване навчання - ШІ-системи можуть аналізувати дані про здобувача освіти (наприклад, темп навчання, помилки, слабкі місця) й рекомендувати адаптивні навчальні траєкторії: що вивчати далі, на що звернути увагу, який формат подачі буде найбільш ефективним. Це допомагає враховувати індивідуальні потреби студентів, створювати гнучкі сценарії навчання.

2. Підтримка викладача та автоматизація адміністративних задач - ШІ-інструменти можуть брати на себе рутинні функції — оцінювання (автоматизоване тестування або попередня оцінка відповідей), створення навчальних матеріалів, адаптація ресурсів, аналіз активності здобувача освіти. Це дає викладачам більше часу на науково-дослідну роботу, творчість.

3. Інклюзія та доступність - ШІ може допомогти здобувачам освіти з особливими освітніми потребами: наприклад, розпізнавання мовлення, адаптивні інтерфейси, переклади, допоміжні технології. Крім того, використання даних і алгоритмів може підтримати навчання дорослих, неповно-зайнятих чи тих, хто хоче підвищити кваліфікацію.

4. Нові форми навчання та оцінювання - системи, які в режимі реального часу аналізують процес навчання, надають зворотний зв’язок учню, викладачу або батькам. Також - використання симуляцій, віртуальних агентів, гейміфікації на основі ШІ. Крім того, ШІ може використовуватися в системах “інтелектуальної” перевірки знань, виявлення знань-пробілів, контролю прогресу.

5. Формування навичок майбутнього - оскільки ШІ стає все більш розповсюдженим, освітні системи ЄС визнають важливість “ШІ-грамотності” (AI literacy) - здатності розуміти, взаємодіяти, створювати з ШІ, а не лише пасивно користуватись.

ЄС значно стимулює впровадження ШІ в освіту (інвестування, проєкти, підтримка цифрової освіти) і водночас вводить чітке регулювання (AI Act, етичні настанови). Це характерна риса “європейського підходу”.

Висновки

Таким чином, основними рекомендаціями та перспективами щодо використання ШІ у сфері освіти є:

- розробка чіткої політики використання ШІ у навчальних закладах: враховувати етику, права людини, регулювання, інклюзію.
- інвестування у підготовку викладачів: навчання, методичні матеріали, підтримка зміни педагогічних практик.
- впровадження механізмів моніторингу, оцінювання впливу ШІ-систем у навчанні - ефективність, вплив на здобувачів, потенційні ризики.
- формування серед користувачів компетенції ШІ-грамотності: розуміння, критичне ставлення, відповідальне використання.
- збільшення акценту на «створенні ШІ» здобувачами - не лише використанні, але й засвоєнні основ моделей, алгоритмів, критичного аналізу.
- підвищення ролі міжнаціональних ініціатив у освітньому просторі: обмін даними, інструментами, стандартами, адаптованими до різних національних контекстів.
- посилення досліджень аналіз впливу ШІ-викладання на результати, на поведінку здобувачів, на педагогіку, на економіку освіти.

Застосування штучного інтелекту в сфері освіті ЄС має великий потенціал: персоналізація навчання, підтримка викладачів, підвищення доступності, розвиток нових навичок. Водночас воно супроводжується серйозними викликами - етичними, правовими, педагогічними, соціальними. У Європейському Союзі підходять до цього комплексно: поєднують технологічні інновації із чітким регулюванням, орієнтацією на права людини та інклюзію, підготовкою кадрів і зміною педагогіки.

Для ефективності такого застосування необхідно, щоб освітні системи, заклади, викладачі й студенти працювали разом - із розумінням технології, її меж, а також з критичним підходом до того, як вона використовується. У найближчі роки можна очікувати поглиблення використання ШІ в освіті, коли ШІ-інструменти стануть більш поширеними, а освітні моделі – гнучкішими.

Література

[1] European Commission. Digital Education Action Plan (2021–2027): Resetting education and training for the digital age. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. [Електронний ресурс]. –Режим доступу: Джерело: https://education.ec.europa.eu/focus-topics/digital-education/action-plan

[2] European Parliament and Council of the European Union. Regulation (EU) 2024/1689 – Artificial Intelligence Act (AI Act). Official Journal of the European Union, 2024. [Електронний ресурс]. –Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R1689

[3] Council of Europe. Ethical guidelines on the use of Artificial Intelligence and data in teaching and learning for educators. Strasbourg: Council of Europe, 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.coe.int/en/web/education/artificial-intelligence

Розробка застосунку для генерування зображень додатків до свідоцтв про здобуття повної загальної середньої освіти та обчислення їх середнього балу

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.050

Юрій Климюк
Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
yu.ye.klymiuk@nuwm.edu.ua

Анотація—**Здійснено генерування покращених тренувального, перевірочного та тестового наборів зображень можливих оцінок додатків до свідоцтв про здобуття повної загальної середньої освіти абітурієнтів з більш широко використовуваним на практиці шрифтом "Times New Roman" українською мовою і курсивним накресленням тексту. Шляхом донавчання моделі ResNet50 на основі покращених тренувальних, перевірочних та тестових наборів даних зображень оцінок розроблено покращений класифікатор зображень оцінок. На його основі розроблено застосунок для генерування зображень свідоцтв про здобуття повної загальної середньої освіти абітурієнтів та здійснення розрахунку їх середнього балу. Проведене тестування застосунку свідчить про коректне розпізнавання усіх оцінок з точністю вище 90% із згенерованих зображень додатків до свідоцтв і правильний розрахунок середнього балу свідоцтва.**

Ключові слова—генерування, набір даних, зображення, оцінка, класифікатор, свідоцтво, додаток, абітурієнт

I. Вступ

Цифрова епоха освіти вимагає відмови від неефективних практик. У цьому контексті для науково-педагогічних працівників та адміністративного персоналу штучний інтелект є потужним інструментом для автоматизації рутинних завдань. Під час вступної кампанії визначення середнього балу свідоцтва (атестата) на основі документів абітурієнтів є надзвичайно трудомісткою та схильною до помилок операцією. Ручна обробка сканкопій додатків до свідоцтв забирає багато часу. Розробка і впровадження інтелектуальних систем для автоматичного розпізнавання оцінок із цих сканкопій та розрахунок їх середнього балу є ключовим кроком до суттєвої оптимізації часу. У [1] реалізовано модель для класифікації зображень оцінок, яка на тестовому наборі даних склала 93,79%. Одним з недоліків отриманого класифікатора зображень є непрактичні для подальшого застосування отримані тренувальні, перевірочні та тестові набори даних, оскільки функцією putText() бібліотеки OpenCV підтримується лише один україномовний шрифт "Hershey Complex" зі звичайним накреслення тексту для формування написів на зображеннях. Тому досить актуальною задачею є отримання покращених тренувальних, перевірочних та тестових наборів даних зображень оцінок з більш широко використовуваним на практиці шрифтом "Times New Roman" українською мовою і курсивним накресленням тексту, на їх основі розробки покращеного класифікатора зображень оцінок і для тестування можливості його використання на практиці розробки застосунку для генерування зображень додатків до свідоцтв та розрахунку їх середнього балу.

II. Постановка задачі

Розробка застосунку для генерування зображень додатків до свідоцтв про здобуття повної загальної середньої освіти абітурієнтів та розрахунку їх середнього балу потребує:

– формування покращених тренувальних, перевірочних та тестових наборів даних зображень оцінок шрифтом "Times New Roman" курсивним накреслення тексту;

– розробки покращеного класифікатора зображень оцінок шляхом донавчання моделі ResNet50 на основі покращених тренувальних, перевірочних та тестових наборів даних зображень оцінок;

– розробки застосунку для генерування зображень додатків до свідоцтв та обчислення їх

середнього балу на основі стандартного бланку додатку до свідоцтва про здобуття повної загальної середньої освіти розміру А5.

III. Алгоритм розв'язання

Генерування покращених тренувальних, перевірочних та тестових наборів даних для класифікатора зображень оцінок, призначеного для розпізнавання оцінок із сканкопій додатків до свідоцтв про здобуття повної загальної середньої освіти абітурієнтів, реалізовано шляхом розробки нової функції generation_attachments() та допоміжної функції draw_image_text() з використання бібліотеки Pillow замість OpenCV для формування текстових написів на зображеннях шрифтом "Times New Roman" українською мовою і курсивним накресленням тексту, та оновлення функції generation_dataset_grade(). На основі згенерованих покращених тренувальних, перевірочних та тестових наборів даних шляхом донавчання моделі ResNet50 аналогічно [2] розроблено покращений класифікатора зображень оцінок. Застосунок для генерування зображень додатків до свідоцтв та обчислення їх середнього балу реалізовано мовою програмування Python з використанням редактора VS Code та покращеної навченої моделі для класифікації зображень оцінок (рис. 1).

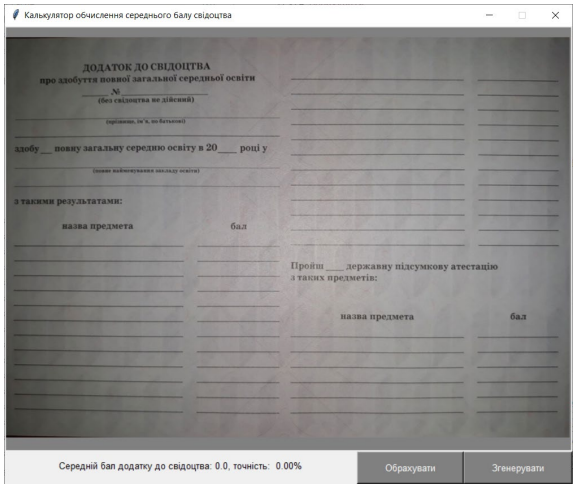


Рисунок 1. Застосунок для генерування зображень додатків до свідоцтв та обчислення їх середнього балу

IV. Результати числових розрахунків

У ході комп'ютерних експериментів згенеровано тренувальний, перевірочний та тестовий набори зображень можливих оцінок додатків до свідоцтв, які відповідно містять 6892, 3795 і 2063 зображень оцінок, отримано покращений класифікатор зображень оцінок, точність якого стосовно розпізнавання зображень оцінок на тестовому наборі даних склала 97,19% (рис. 1). Проведено тестування застосунку для генерування зображень додатків до свідоцтв та обчислення їх середнього балу, зокрема, проведений експеримент на основі згенерованого зображення додатку свідчить про коректне розпізнавання усіх оцінок з середньою точністю 95.55% і аналогічно [2] правильний розрахунок середнього балу свідоцтва (рис. 2).

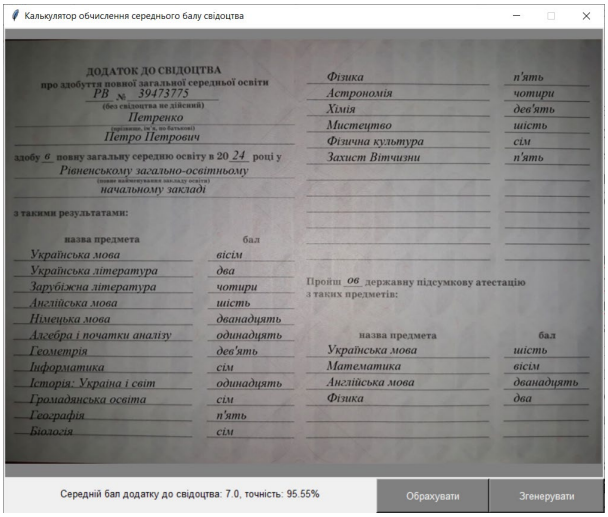


Рисунок 2. Результат обчислення середнього балу свідоцтва про здобуття повної загальної середньої освіти абітурієнта на основі згенерованого зображення додатку до свідоцтва

V. Висновки

Запропоновані нові версії функції generation_attachments(), допоміжна функція draw_image_text() та оновлена версія функції generation_dataset_grade() дозволили згенерувати тренувальний, перевірочний та тестовий набори зображень можливих оцінок додатків до свідоцтв про здобуття повної загальної середньої освіти абітурієнтів з більш широко використовуваним на практиці шрифтом "Times New Roman" українською мовою і курсивним накресленням тексту. Шляхом донавчання моделі ResNet50 на основі покращених тренувальних, перевірочних та тестових наборів даних зображень оцінок розроблено покращений класифікатор зображень оцінок. На його основі розроблено застосунок для генерування зображень свідоцтв про здобуття повної загальної середньої освіти абітурієнтів та здійснення розрахунку їх середнього балу. Проведене тестування застосунку свідчить про коректне розпізнавання усіх оцінок з точністю вище 90% із згенерованих зображень додатків до свідоцтв і правильний розрахунок середнього балу свідоцтва.

Література

[1] Климюк Ю. Є. Розробка класифікатора зображень оцінок для розпізнавання оцінок із сканкопій додатків до свідоцтв про здобуття повної загальної середньої освіти абітурієнтів // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування (2(106)). – 2024. – С. 150-167.

[2] Климюк Ю. Є. Застосування штучного інтелекту в освітньому процесі: розрахунок середнього балу свідоцтва про здобуття повної загальної середньої освіти на основі сканкопії додатку // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Цифрова трансформація в освіті: виклики та перспективи" (Київ, 15 – 16 квітня 2025 року). Київ, 2025. С. 277-278.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Адаптивні нейромережеві моделі оцінювання та регулювання когнітивного навантаження у навчальних іграх

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.051

Петро Остаповець
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
p.p.ostapovets@nuwm.edu.ua

Олена Демчук
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
o.s.demchuk@nuwm.edu.ua

Анотація— **У статті розглядаються адаптивні нейромережеві моделі для оцінювання та регулювання когнітивного навантаження у навчальних комп'ютерних іграх. Запропоновано підхід із застосуванням online learning на основі рекурентних нейромереж (LSTM/GRU) та механізму Elastic Weight Consolidation (EWC) для стабільності дрейфу моделі. Пропонована система використовує мультимодальні дані такі як ігрові метрики та поведінкові показники для динамічного регулювання складності навчального процесу. Представлено концепцію експериментальної реалізації із порівнянням online та offline методів навчання. Оцінюється потенціал підходу в підвищенні ефективності навчання та залученості користувачів.**

Ключові слова: когнітивне навантаження, онлайн-навчання, нейромережеві моделі, навчальні ігри, адаптивне навчання, штучний інтелект

I. Вступ

В сучасній освіті навчальні комп'ютерні ігри набувають все більшої популярності як інструмент, що поєднує гейміфікацію, адаптивне навчання та штучний інтелект. Ефективність цих систем значною мірою залежить від підтримки оптимального рівня когнітивного навантаження у гравця. Якщо навантаження перевищує його когнітивні можливості, це призводить до інформаційного перевантаження і зниження засвоєння знань, а у разі недостатнього стимулу знижується мотивація та активність навчання.

Низка сучасних досліджень демонструє, що динамічне управління когнітивним навантаженням сприяє кращому засвоєнню матеріалу і розвитку когнітивних навичок [1–4]. Проте більшість існуючих систем адаптації базуються на заздалегідь визначених правилах або офлайн-навчених моделях, які не враховують оперативних змін у поведінці користувача під час ігрового процесу.

II. Викладення основного матеріалу

У цьому аспекті перспективною є розробка адаптивних нейромережевих моделей із онлайн-навчанням, що можуть в реальному часі оцінювати стан гравця і динамічно коригувати параметри навчального контенту, грунтуючись на рівні когнітивного навантаження. Онлайн-навчання передбачає поступове оновлення параметрів моделі на основі потоку нових даних, без необхідності повного перенавчання, що забезпечує безперервну адаптацію в динамічному середовищі гри.

Запропонована нейромережа аналізує мультимодальні дані: ігрові метрики (реакція користувача, помилки, швидкість проходження та кількість спроб), поведінкові характеристики (швидкість руху курсора, кількість натискань, темп взаємодії) і прості біометричні сигнали (мікрозатримки натискань та дані eye-tracking). Для обробки цієї інформації використовується багатошаровий рекурентний блок типу online LSTM або GRU, що здатен послідовно аналізувати часові ряди в реальному часі. Після кожного ігрового циклу модель оновлює свої ваги, коригуючи прогноз когнітивного стану [2].

Щоб уникнути втрати важливого досвіду, впроваджено механізм Elastic Weight Consolidation (EWC), який захищає значущі ваги, забезпечуючи стабільність системи під час тривалих сесій [3]. Вихід моделі представлено у вигляді індексу когнітивного навантаження (CL), що може бути як числовим значенням, так і класифікацією за рівнями (низький, середній, високий).

Ця оцінка керує модулем регулювання складності навчального процесу, який реалізує два підходи: правило-орієнтована адаптація змінює складність завдань, кількість підказок або темп навчання залежно від заданих меж CL; підкріплювальне навчання (Reinforcement Learning) використовує агента, що самостійно оптимізує параметри контенту, враховуючи зворотний зв'язок від користувача. Таким чином утворюється замкнений цикл, який поєднує аналіз, прогноз, адаптацію та оновлення, що відповідає концепції «потоку» за Міхаїлом Чіксентмігайї [4].

Для практичної реалізації готується прототип у середовищі Unity 3D з інтеграцією телеметрії та

нейромережевого аналізу через Python API (TensorFlow/PyTorch). Планується порівняння традиційного offline-підходу з інкрементальним online-навчанням за такими показниками: точністю прогнозу (R2, MAE), часом адаптації, стабільністю ваг (EWC loss) і продуктивністю користувача, яка охоплює успішність виконання завдань та рівень залучення.

Для валідації оцінок в лабораторних умовах будуть використані суб'єктивні шкали самооцінки NASA-TLX або Paas' Cognitive Load Scale, які учасники заповнюють після кожного завдання. У польових випробуваннях система працюватиме виключно на основі виведених ігрових та поведінкових показників, що дозволить оцінити її придатність без додаткових сенсорів. Планується також проведення A/B-тестування, аби порівняти вплив адаптивної системи на поведінку та успішність учасників [1].

III. Висновки

Запропонований підхід із адаптивними нейромережевими моделями для оцінки і регулювання когнітивного навантаження у навчальних іграх є перспективним напрямом для підвищення ефективності навчання. Проведення експериментів із порівнянням online та offline моделей дозволить показати переваги безперервної адаптації. Впровадження механізму EWC забезпечує стабільність моделей під час тривалих сесій. Оцінка за допомогою мультимодальних даних підвищує точність прогнозу когнітивного навантаження й сприяє персоналізації навчального процесу. Вірогідне підвищення залученості користувачів робить цей підхід цінним для цифрової педагогіки майбутнього.

Література

[1] V. Sevcenko et al., "Measuring cognitive load using in-game metrics of a Serious Simulation Game," Frontiers in Psychology, vol. 12, 2021.

[2] J. Tong et al., "Dual-stream deep knowledge tracing with cognitive load estimation," Scientific Reports, 2025.

[3] J. Leppink et al., "Development of an instrument for measuring different types of cognitive load," Behavior Research Methods, vol. 45, no. 1, pp. 105-119, 2013.

[4] M. Lanham, Hands-on deep learning for games. Packt Publishing, 2019.

MCIT Modeling, control & information technologies

Програмний інтелектуальний засіб стискання даних у міжмашинній комунікації

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.052

Марія Петрова
Інститут комп'ютерних систем
Національний університет "Одеська політехніка"
Одеса, Україна
mariyapetrova2003@gmail.com

Марія Попова
Інститут комп'ютерних систем
Національний університет "Одеська політехніка"
Одеса, Україна
popova.m.o@op.edu.ua

***Анотація*—Метою роботи є розробка інтелектуального засобу стискання відеопотоку для систем відеспостереження в умовах міжмашинної комунікації. Ця розробка призначена для зменешення обсягу даних, за умови забезпечити високу якість важливих об'єктів для подальшої роботи з ними людини. Такий метод забезпечить підвищення ефективності передачі відео з меншим навантаженням мережи або в умовах низької пропускної здатності. Для реалізації використовуватимуться модель комп'ютерного зору YOLO та кодек H.265 з відкритою бібліотекою FFmpeg.**

Ключові слова — Internet of Things, Machine-to-Machine, Human-in-the-loop, інтелектуальна стиснення

I. Вступ

Сьогодні обмін даними посідає значне місце в житті людей. З розвитком сучасних технологій людство звикає до постійного зростання обсягів інформації, що включає в себе збільшення і кількості, і якості. Збільшується і кількість пристроїв, що скоюють обмін даними. За прогнозами науковців[1] до кінця 2025 року на 1 людину в середньому приходитиметься приблизно 9 пристроїв, які використовуються для обміну інформацією. І при цьому користувачі постійно женуться за підвищенням комфорту при користуванні цих пристроїв. Наприклад, з постійною появою вищої роздільної здатності відео, користувачі звикають і не бажають повертатися до тої якості картинки, яка існувала 10 років тому.

Підвищення обсягів даних загалом є цілком зумовленим явищем, адже і апаратні здатності також зростають з кожним роком. При цьому, ресурси для оперування даними все ще не є нескінченними, а пропускна здатність не є повсюдно достатньою для передачі запитуваних обсягів. Поки що не існує срібної кулі, яка б дозволила безперешкодно надсилати і отримувати великі обсяги інформації. Тому з метою економії використовується компресія та декомпресія даних.

Компресія та декомпресія раніше були тісно пов'язані з кодеками[2-3], і більше різнилися за типом даних, для компресії та декомпресії яких вони використовувалися. Але з розвитком штучного інтелекту тепер компресія та декомпресія має більший спектр ознак, за якими визначається подальша робота з вхідними даними - наскільки важлива якість даних, збереження оригінальності, можлива пропускна здатність і так далі.

II. Напрям роботи

Одним з напрямків, яких стосується інтелектуальне стиснення даних, є Machine-to-Machine комунікація, за умови якої пристрої обмінюються даними один з одним без втручання людини. Прикладом цього може стати надсилання відео з камери відеоспостереження на сервер. Але якщо не існує стабільного зв'язку для камери з високою пропускною здатністю, тоді можливим стає або стиснення з високою втратою якості, або повна втрата оригінальної картинки, але отримання основних об'єктів кінцевим пристроїв(в даному випадку - камерою) і передачі отриманої інформації на сервер.

Але при тому, що другий варіант досить розповсюджений, що робити, якщо дані, отримані сервером, треба буде переглянути(наприклад, доступу до камери, де зберігалися оригінальні записи, більше немає)? Тоді необхідно проєктувати архітектуру такого зв'язку, враховуючи орієнтованість на наявність людини.[4]

III. Обране технічне рішення

Пропонується створення адаптивної системи комунікації за допомогою штучного інтелекту, яка дозволить отримати всі необхідні переваги: використовувати основну пропускну здатність для найважливішої інформації, зберігати високу якість об'єктів інтересу та зберегти можливість використання отриманої інформації людиною.

Якщо ми розглядаємо тему відеоспостереження, інтелектуальна система визначатиме важливі об'єкти(наприклад, рухомі об'єкти, такі як машини) і неважливі(наприклад, задній фон) і використовуватиме для них різні ступені стиснення. Після передачі та декомпресії, ми отримуватимемо фінальну картинку з адаптивним стисненням, яка буде придатна для подальшої роботи з нею як з боку серверу, так і з боку людини.

IV. Методи розробки

Розглянемо методи, які стануть основними в процесі розробки засобу, що розглядається.

A. Штучний інтелект

Для аналізу вхідної і роботи з нею використовуватиметься напрямок комп'ютерного зору для виділення необхідних об'єктів на відео(або так званих Regions of Interest). Зокрема доцільним буде використання моделей, що дозволяють працювати з рухомим об'єктами і відстежувати траєкторію їхнього руху. При цьому варто зазначити, що виділятися моделлю мають саме важливі об'єкти, а не тільки ті, які рухаються. Наприклад, на кадрах, де рухається дерево, але стоїть людина, стиснення зі збереженням якості буде проводитися саме в області, де стоїть людина. Для виконання всіх цих вимог була обрана модель YOLO.

B. Кодеки

Кодеки виконуватимуть компресію і, якщо можливо так сформулювати, підкорюватимуться командам моделі з розпізнавання об'єктів. В залежності від виділеного типу об'єкту(ROI або фон) використовуватиметься різний коефіцієнт стиснення. Для цієї роботи був обраний кодек H.265, оскільки він є одним з найпоширеніших в системах відеоспостереження, а також через можливість роботи з окремими регіонами. Керувати адаптивним стисненням можна буде завдяки відкритій бібліотеці FFmpeg.

V. Розробка алгоритму

Завдяки потужним і розповсюдженим засобам, описаним у попередньому розділі, можливе створення алгоритму, який і відповідатиме за інтелектуальне стиснення даних. Варто зазначити, що основні обчислення, які будуть описані далі, будуть проводитися з боку кінцевого пристрою, тому ця розробка передбачає наявність необхідних для роботи моделі обчислюваних потужностей.

З самого початку ми матимемо вхідний відеоряд з камери відеоспостереження. Надалі, завдяки моделі YOLO виконуватиметься визначення ROI та їхньої позиції на зображеннях. На основі отриманих координат формуватиметься маска підвищеної важливості. Надалі завдяки бібліотеці FFmpeg до кодеку H.265 передаватиметься інформація з приводу різних областей зображення, і, відповідно до тих, що позначені як регіони підвищеної важливості, застосовуватиметься знижений коефіцієнт квантування. Для фону(регіонів низької важливості) коефіцієнт навпаки буде вищим. На виході ми отримаємо готове зображення з різним ступенем стиснення, яка далі передаватиметься серверу.

VI. Висновки

Розглянутий алгоритм допоможе значно підвищити ефективність передачі відеоматеріалів для подальшої роботи з ними людиною, за умови роботи в умовах невеликої пропускної здатності. Варто зазначити, що в подальшому основний принцип виділення основного об'єкту з загальної картинки можливо буде розповсюдити і на інші сфери IoT, не тільки на ті, що працюють з графічними даними, але, наприклад, і з аудіо.

Список використаних джерел

[1] Bardia Shafael et al. Reliability Side-Effects in Internet of Things Application Layer Protocols. International Conference on System Reliability and Safety. Milan, December 2017, pp. 207-212. DOI:10.1109/ICSRS.2017.8272822

[2] A. Učakar, P. Selič, R. Urbas. Use of codecs in video uploads. 10th International Symposium on Graphic Engineering and Design. November 2020, pp. 643 - 649. DOI:10.24867/GRID-2020-p73.

[3] Duarte Avelar. Audio Codecs: Evaluation and Comparison of Popular Formats. January 2008.

[4] Nimasha Arambepola, Lankeshwara Munasinghe. Human in the loop design for intelligent interactive systems: A systematic review. International Conference on Applied and Pure Sciences. October 2021. Vol. 01. pp. 64 - 70. URL: https://www.researchgate.net/publication/358581717_Human_in_the_loop_design_for_intelligent_interactive_systems_A_systematic_review (Reached at 15.09.2025)

Прогнозування траєкторій рухомих об'єктів як елемент інтелектуального відеоспостереження з БПЛА

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.052

Віктор Подвишенний
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
v.s.podvyshenyi@nuwm.edu.ua

Андрій Сафоник
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Анотація **- У роботі проведено порівняльний аналіз трьох сучасних методів трекінгу, що застосовуються у системах комп'ютерного зору для відстеження об'єктів у динамічних умовах з метою прогнозування траєкторій рухомих об'єктів, що є ключовим елементом інтелектуального відеоспостереження з використанням безпілотних літальних апаратів. Розглянуто їх ефективність за різних сценаріїв зйомки та проаналізовано можливі напрями підвищення точності та надійності відстеження, зокрема для завдань прогнозування траєкторій. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем відеоспостереження на базі дронів у задачах моніторингу та безпеки.**

Ключові слова **– комп'ютерний зір; трекінг об'єктів; прогнозування траєкторій руху; безпілотні літальні апарати.**

I. ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) дедалі активніше використовуються для розв'язання широкого спектра задач — від контролю дорожнього руху та пошуково-рятувальних операцій до охорони стратегічних об'єктів та державних кордонів. Ефективність таких систем значною мірою залежить від здатності не лише виявляти рухомі об'єкти, а й прогнозувати їх подальший рух.

Прогнозування траєкторій дає змогу підвищити точність трекінгу навіть у складних умовах, коли об'єкт тимчасово зникає з поля зору камери, змінює траєкторію руху або перебуває серед перешкод. Це створює підґрунтя для розвитку більш автономних систем відеоспостереження та їх практичного застосування у сфері безпеки й оборони.

II. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

Класичні методи трекінгу рухомих об'єктів тривалий час залишалися основою систем відеоспостереження. До них належать фільтр Калмана, методи асоціації детекцій та алгоритми оптичного потоку. Вони забезпечують достатню швидкодію та ефективність у випадках із невеликою кількістю об'єктів і відносно передбачуваним рухом. Проте за умов динамічних середовищ, коли об'єкти перекриваються або різко змінюють траєкторію, точність таких методів суттєво знижується.

Розвиток комп'ютерного зору та глибинного навчання відкрив нові можливості для підвищення якості трекінгу. Сучасні системи поєднують детектори об'єктів, такі як YOLOv8, з алгоритмами асоціації траєкторій (DeepSORT, ByteTrack), що дозволяє ефективніше працювати з великими потоками даних та складними сценами. На відміну від класичних рішень, ці методи здатні враховувати просторово-часові залежності та зменшувати кількість помилок при втраті об'єкта з поля зору.[1]

Окремим напрямом досліджень є прогнозування майбутніх положень об'єктів. Тут застосовуються як нейронні мережі (наприклад, LSTM), так і комбіновані алгоритми, що поєднують класичні підходи з глибинними моделями. Це дозволяє системам не лише відслідковувати поточне положення, а й передбачати можливі траєкторії руху, що особливо важливо для використання дронів у завданнях моніторингу та безпеки.[2]

Переваги сучасних методів трекінгу й прогнозування включають:

- стійкість до часткових перекриттів та втрати об'єкта з кадру;
- здатність працювати у складних і динамічних середовищах;
- можливість інтеграції з детекторами об'єктів нового покоління;
- підвищення точності завдяки урахуванню історії руху.

Таким чином, сучасні дослідження свідчать про значний прогрес у напрямі трекінгу та прогнозування, однак жоден із підходів не є універсальним. Це визначає необхідність порівняння кількох методів і пошуку шляхів їхнього вдосконалення у практичних системах відеоспостереження з використанням дронів.

III. ОПИС ДОСЛІДЖЕННЯ

Моделювання системи трекінгу проводилося у середовищі PyCharm на ноутбуці Dell, використовуючи відеофайли формату mp4. Метою

дослідження було порівняння трьох сучасних алгоритмів трекінгу об'єктів у відео: DeepSORT, ByteTrack та StrongSORT, у поєднанні з моделлю детекції об'єктів YOLOv8.

1. DeepSORT

DeepSORT є удосконаленою версією класичного SORT, яка додає використання ознак зовнішнього вигляду об'єктів для зменшення помилок асоціації. [3]. Принцип роботи:

- Детекція об'єктів: YOLOv8 генерує прямокутники об'єктів у кожному кадрі.
- Асоціація об'єктів: Кожен детектований об'єкт порівнюється з існуючими треками за допомогою Mahalanobis distance та ознак зовнішнього вигляду.
- Оновлення треків: Використовується Kalman Filter для передбачення положення об'єкта у наступному кадрі.

Математично, оновлення стану об'єкта x_k здійснюється через рівняння Калмана:

$$x_k = Fx_{k-1} + Bu_k + w_k,$$

$$z_k = Hx_k + v_k$$

де x_k - вектор стану, z_k - вимірювання, F - матриця переходу, H - матриця спостереження, w_k,v_k - шуми процесу та вимірювання.

2.ByteTrack

ByteTrack розширює підхід DeepSORT, враховуючи детекції з низькою впевненістю для покращення безперервності треків. Принцип роботи:

- Детекція об'єктів: YOLOv8 знаходить об'єкти з високою та низькою впевненістю.
- Двоетапна асоціація: Спочатку асоціюються об'єкти з високою впевненістю, потім — з низькою, що дозволяє підтримувати треки при часткових перекриттях або тимчасовій втраті об'єктів.
- Оновлення треків: Використовується Kalman Filter для прогнозування та корекції положення.

Алгоритм зменшує кількість розривів треків і підвищує стійкість при хаотичному русі об'єктів.

3.StrongSORT

StrongSORT є подальшим розвитком DeepSORT і ByteTrack, інтегруючи вдосконалені методи асоціації та фільтрації треків для мінімізації помилок. [4]

Принцип роботи:

- Використовує потужні ознаки зовнішнього вигляду та методи відсікання слабких треків для уникнення помилок ID Switches.
- Асоціація об'єктів проводиться через комбінацію IOU (Intersection over Union) та відстаней у просторі ознак.
- Підтримує передбачення траєкторій та корекцію позицій через Kalman Filter, як у попередніх алгоритмах.

StrongSORT забезпечує високу стабільність трекінгу навіть у складних умовах з перекриттями та великою кількістю об'єктів у кадрі.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

DeepSORT + YOLOv8 показав прийнятну точність, але помітну кількість помилок асоціації при великій кількості об'єктів. Точність MOTA становила 73–80%, кількість ID Switches була середньою (≈ 400–700), швидкодія — 25–30 FPS. Алгоритм добре працює у помірно складних сценах, проте при високій щільності рухомих об'єктів може виникати багато розривів траєкторій.

ByteTrack + YOLOv8 продемонстрував вищу точність і кращу стабільність завдяки двоетапній асоціації та використанню низьковпевнених детекцій. MOTA склала 80–84%, кількість ID Switches — низька (≈ 150–300), швидкодія — 28–32 FPS. Алгоритм відзначається високою стійкістю до тимчасової втрати об'єктів і хаотичного руху.

StrongSORT + YOLOv8 показав найкращі результати з точки зору точності та мінімізації помилок. MOTA — 82–86%, кількість ID Switches — дуже низька (≈ 100–200), швидкодія — 22–27 FPS. Цей метод забезпечує максимально безперервне відстеження навіть у складних умовах із високою щільністю об'єктів і частковим перекриттям.

Таблиця I. Порівняння алгоритмів трекінгу

Алгоритм	MOTA (%)	ID Switches	FPS
DeepSORT + YOLOv8	73–80	середній ≈ 400–700	25–30
ByteTrack + YOLOv8	80–84	низький ≈ 150–300	28–32
StrongSORT + YOLOv8	82–86	дуже низький ≈ 100–200	22–27

ВИСНОВКИ

Отримані результати показали, що використання удосконалених алгоритмів трекінгу, які враховують ознаки зовнішнього вигляду та детекції з низьким рівнем впевненості, підвищує точність і стабільність відстеження. Таким чином, StrongSORT + YOLOv8 демонструє найкращий баланс між точністю і мінімізацією помилок, тоді як DeepSORT підходить для середніх навантажень із більшим FPS, а ByteTrack — для задач із хаотичним рухом і високою щільністю об'єктів.

Для подальшого підвищення ефективності рекомендується:

- оптимізація StrongSORT для підвищення швидкодії без втрати точності;
- підвищення стійкості алгоритмів до шуму, змін освітлення та перешкод;
- інтеграція прогнозування траєкторій для більш автономного контролю рухомих об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Roth, K., Pemula, L., Zepeda, J., Scholkopf, B., Brox, T., Gehler, P. Towards total recall in industrial anomaly detection. In: 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 1–12. DOI: https://doi.org/10.1109/cvpr52688.2022.01392

[2] Zipfel, J., Verworner, F., Fischer, M., Wieland, U., Kraus, M., Zschech, P. Anomaly detection for industrial quality assurance: A comparative evaluation of unsupervised deep learning models. Computers & Industrial Engineering, 2023, vol. 177, article 109045. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109045

[3] He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. Deep residual learning for image recognition. In: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp. 770–778. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90

[4] Bochkovskiy, A., Wang, C., Liao, H. Y. M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection [Electronic resource]. arXiv preprint arXiv:2004.10934, 2020. Available at: https://arxiv.org/abs/2004.10934 (accessed 30.09.2025).

MCIT Modeling, control & information technologies

Сервіс на базі штучного інтелекту для допомоги у форматуванні академічних робіт

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.054

Вячеслав Шендеровський
Кафедра інженерії програмного забезпечення
Національний університет «Одеська політехніка»
Одеса, Україна
slavikshend@gmail.com

Вікторія Рувінська
Кафедра інженерії програмного забезпечення
Національний університет «Одеська політехніка»
Одеса, Україна
victoriya.ruvinskaya@gmail.com

Анотація— **У статті запропоновано сервіс на базі штучного інтелекту для автоматизованого форматування академічних робіт відповідно до тексту вимог конкретної конференції, журналу чи університету. Сервіс аналізує норму стилю оформлення, виявляє відхилення (відступи, шрифти, посилання, формули) і автоматично приводить текст до потрібного формату. Розроблене рішення покликане значно скоротити час на ручне форматування та знизити ймовірність помилок.**

Ключові слова—сервіс, штучний інтелект, форматування, академічні роботи.

I. ВСТУП

Форматування – одна з найбільш трудомістких і рутинних частин підготовки академічного документу. Часто автор мусить вручну приводити текст, таблиці, рисунки, списки літератури до специфікацій конференції, університету чи журналу – і ці вимоги можуть кардинально відрізнятися. При цьому стандарти форматування постійно змінюються – оновлюються шаблони, вводяться нові правила, іноді змінюються стиль цитування або вимоги до оформлення рисунків та таблиць.

Наприклад, дослідження LeBlanc et al. показало, що середній час форматування однієї статті – 14 годин, а в середньому це приносить втрати приблизно 52 години на рік для одного дослідника [1]. При цьому опитування показують, що авторів постійні зміни вимог до форматування відволікають від наукового змісту і знижують продуктивність. Також часто викладачі-керівники кваліфікаційних робіт, члени університетських комісій малого захисту витрачають багато особистого часу на ітеративну перевірку академічних робіт [2], часто власноруч, що може призводити до помилок через людський фактор.

Крім того, в Україні вже існують спроби автоматизувати перевірку академічних робіт: наприклад, створено систему перевірки кваліфікаційних робіт, яка дозволяє керівнику витрачати лише кілька хвилин на аналіз оформлення й змісту роботи замість десятків годин ручної перевірки [2]. Це демонструє як потребу, так і можливість розробки подібних інструментів для форматування в ширшому масштабі.

Метою цієї роботи є створення сервісу на базі штучного інтелекту, який допомагатиме автоматично форматувати академічні роботи під стандарти конкретної конференції або видання.

Об’єкт роботи – процес форматування текстових документів академічного характеру.

Предмет роботи – програмна система (сервіс), що аналізує документ і автоматично застосовує потрібні стилі, правила й шаблони форматування.

II. АНАЛІЗ ВИМОГ ДО ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ

A. Опис предметної області

Сервіс на базі ш тучного інтелекту для допомоги у форматуванні академічних робіт є прикладом сучасного вебзастосунку освітньо-наукового спрямування. Основна його мета – автоматизація процесів підготовки та оформлення текстових документів (курсових, дипломних робіт, наукових статей, тез конференцій тощо) відповідно до стандартів та вимог різних організацій.

У системі передбачені такі основні сутності: документ, користувач, підписка.

Для кожного документа зберігається його назва, вибрані вимоги для оформлення (наприклад, ДСТУ або власний документ з вимогами), статус форматування та фінальний відформатований результат;

Користувач має ім’я, прізвище, адресу електронної пошти, пароль, а також роль, що визначає його можливості у системі. Для клієнта доступні функції реєстрації, авторизації, завантаження документів, вибору стандарту форматування, оплати підписки та зверення до технічної підтримки. Адміністратор системи, окрім цього, має можливість переглядати звітність, керувати акаунтами клієнтів, а також відповідати на запити до технічної підтримки.

Для доступу до повного функціоналу користувач може оформити підписку. Вона містить інформацію про тип підписки (базова, розширена,

професіональна), дату початку та завершення, статус (активна, завершена, призупинена), а також кількість доступних для форматування сторінок документів на місяць.

B. Аналіз аналогів

Порівняльна характеристика наявних рішень представлена на таблиці 1.

ТАБЛИЦЯ І. Порівняльна характеристика наявних рішень

	Chat GPT	slite	textformatter .ai	Сист ема
Власні вимоги до форматування	+	-	-	+
Перевірка граматики, орфографії, пунктуації	+	-	-	+
Форматування по ДСТУ	+	-	-	+
Захищеність робіт	-	-	-	+

Отже, аналіз аналогів показав, що жодне з існуючих рішень не забезпечує повного набору функцій, необхідних для зручного та якісного форматування академічних робіт. Зокрема, сервіси ChatGPT, Slite та textformatter.ai частково виконують завдання перевірки граматики чи базового форматування, однак вони не підтримують форматування за стандартами ДСТУ та не гарантують захищеності робіт.

C. Визначення функціональних вимог до системи

Цей підрозділ визначає ключові вимоги до функціонала системи автоматизованого форматування академічних робіт із використанням штучного інтелекту. Функціональні вимоги можна представити у вигляді наборів прецедентів:

– для неавторизованих користувачів: «Авторизація», «Реєстрація».

– для авторизованих користувачів: окрім можливостей, що передбачені для неавторизованих користувачів, доступні такі прецеденти: «Оплата підписки», «Завантаження документа», «Форматування документа за заданими вимогами», «Форматування документа за стандартом ДСТУ»,

– для адміністраторів системи: окрім функцій клієнтів, також доступні: «Керування підписками», «Адміністрування шаблонів форматування» (додавання/оновлення стандартів), «Перегляд та аналіз звітності».

Діаграма прецедентів представлена на рис. 1.

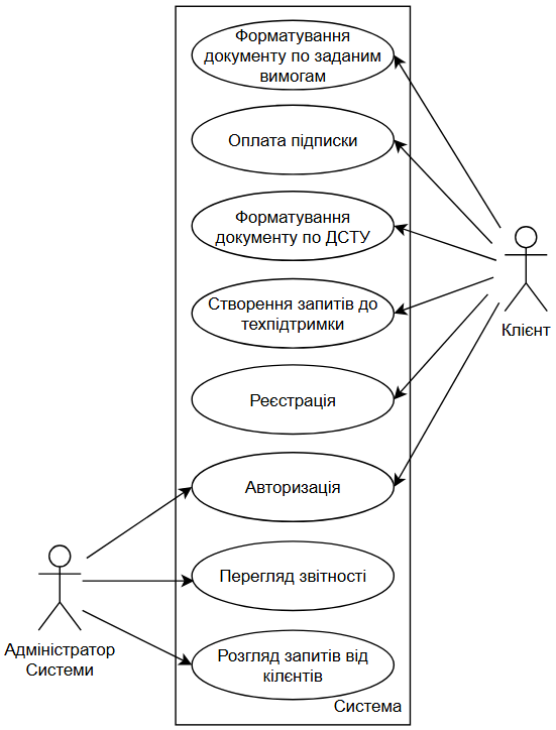


Рисунок 1. Діаграма варіантів використання

D. Визначення нефункціональних вимог до системи

Окрім функціональних вимог, мають бути визначені й нефункціональні вимоги, що описують загальну якість системи для роботи з документами та задають критерії для оцінки якості її роботи. Нижче наведені основні атрибути якості застосунку відповідно до структури стандартів ISO/IEC 25000 [4].

1. Сценарії надійності:

– система повинна забезпечувати коректність збереження документа з імовірністю не менше 99,9%;

– у випадку збою робота з документом повинна відновлюватися протягом не більше 2 хвилин без втрати даних;

– автоматичне резервне копіювання версій документа повинно виконуватись щонайменше раз на добу.

2. Сценарії ефективності:

– час відкриття документа має становити не більше 2 секунд для 90% користувачів;

– час перевірки документа на помилки (граматика, орфографія, стиль) не повинен перевищувати 5 секунд для тексту обсягом до 10 сторінок;

– максимальна кількість одночасних користувачів, що редагують документи, повинна бути не менше 100.

3. Сценарії зручності використання:

– середня тривалість внесення та збереження виправлень у документі має бути не більше 5 секунд;

– система повинна автоматично виправляти до 90% граматичних і стилістичних помилок;

– інтерфейс перевірки та виправлення повинен бути зрозумілим для користувачів без попереднього навчання.

4. Сценарії супроводжуваності:

– виправлення виявленої помилки у модулі перевірки документів має здійснюватися протягом 24 годин;

– додавання нового модуля перевірки (наприклад, перевірка пунктуації, стилістики) має здійснюватися протягом 2 тижнів;

– система повинна підтримувати швидку інтеграцію з іншими сервісами (наприклад, хмарними сховищами) без зміни базового коду.

5. Сценарії безпеки:

– доступ до документів має здійснюватися виключно авторизованими користувачами;

– система повинна забезпечувати захищене зберігання документів за допомогою шифрування;

– система має бути захищена від спроб несанкціонованого редагування або видалення документа з ефективністю не менше 99,9%.

III. Проєктування системи

A. Опис архітектури системи

У цьому розділі розглядається розроблювана система з погляду архітектурного проєктування.

Система належить до класу вебзастосунків для роботи з документами, тому у такому випадку найбільш оптимальним рішенням є реалізація проєкту на базі клієнт-серверної архітектури з мікросервісним підходом.

Щодо альтернативних архітектурних рішень, може скластися враження, що використання шаблону Модель-Вид-Контролер (MVC) могло б забезпечити необхідний функціонал. Проте типовий проєкт із використанням MVC передбачає монолітний характер системи, що ускладнює масштабування, тестування та інтеграцію з зовнішніми інструментами перевірки тексту. Крім того, при MVC сервер часто відповідає за рендеринг сторінок, що збільшує навантаження та знижує продуктивність.

На відміну від цього, мікросервісна архітектура з Web API дозволяє виділити окремі компоненти системи (перевірка тексту, зберігання даних, облік логів, робота з клієнтами) у незалежні сервіси, що взаємодіють між собою за допомогою REST та протоколу HTTP. Такий підхід підвищує гнучкість, забезпечує простоту оновлення та полегшує масштабування окремих модулів.

До складу системи входять наступні ключові компоненти:

1. Клієнтська частина (Client Side) – реалізована у вигляді односторінкового застосунку (SPA), що динамічно відображає дані та забезпечує зручний інтерфейс користувача. Рендеринг виконується на боці клієнта (CSR), що зменшує навантаження на сервер.

2. Web API – серверна частина, яка виконує роль посередника між клієнтом, базою даних та іншими мікросервісами. Саме API обробляє запити, реалізує бізнес-логіку та надає уніфікований доступ до даних і функціонала.

3. LanguageTool Service – окремий мікросервіс, відповідальний за автоматичний аналіз та виправлення орфографії, пунктуації. Його інтеграція з Web API дозволяє забезпечити перевірку граматики, орфографії та стилістики.

4. Database – основна реляційна база даних, що зберігає документи, користувацькі дані та результати перевірки.

5. Logs Database – додаткова спеціалізована база для зберігання логів взаємодії користувачів із системою, що дозволяє відстежувати помилки, вести аудит та моніторинг ефективності роботи сервісів.

На рис. 2 зображена архітектура системи.

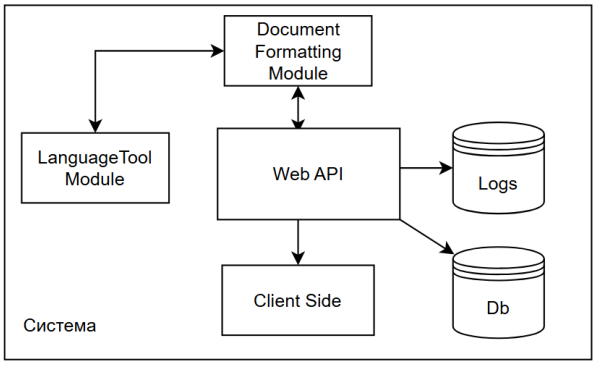


Рисунок 2. Архітектура системи

B. Визначення стеку технологій

Для реалізації системи було обрано сучасний стек технологій, який забезпечує гнучкість, масштабованість та простоту інтеграції з зовнішніми сервісами.

Серверна частина:

– Python FastAPI – фреймворк для створення високопродуктивних Web API. Забезпечує асинхронність, простоту опису REST-інтерфейсів та інтеграцію з іншими сервісами. Використовується для реалізації бізнес-логіки та координації взаємодії клієнта з базами даних і мікросервісами.

– Mammoth – бібліотека для перетворення документів у форматі DOCX у HTML. Використовується для збереження структури тексту без надлишкового форматування.

– Python-docx – бібліотека для створення та модифікації документів DOCX. Дає можливість працювати з документами у програмному режимі, наприклад, для генерації відформатованих файлів після перевірки.

Бази даних:

– PostgreSQL – реляційна база даних, що використовується для зберігання основних даних системи: документів, користувачів та результатів перевірки. Підтримує складні запити, транзакції та забезпечує цілісність даних.

– Apache Cassandra – розподілена база даних, яка застосовується для зберігання логів та великого обсягу неструктурованих даних. Завдяки горизонтальному масштабуванню Cassandra забезпечує високу доступність і стійкість до відмов.

Клієнтська частина: Angular – фреймворк для створення односторінкових застосунків (SPA). Використовується для реалізації клієнтського інтерфейсу системи, що забезпечує інтерактивну взаємодію з користувачем, динамічне відображення даних та інтеграцію з Web API.

Список літератури

[1] LeBlanc AG, Barnes JD, Saunders TJ, Tremblay MS, Chaput J-P (2019) Scientific sinkhole: The pernicious price of formatting. PLoS ONE 14(9): e0223116. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223116

[2] Кучерук, О. В., Желізко, В. В., Савіцький Р. С., & Фант, М. О. (2024). Система перевірки дипломних робіт як інструмент автоматизації роботи студента та викладача. Технічна інженерія, (1(93), с. 176–184.

[3] W. Perdomo, C. M. Zapata, “Software quality measures and their relationship with the states of the software system alpha,” Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 29, no. 2, pp. 346–363, 2021.

СЕКЦІЯ 5

КІБЕРНЕТИЧНА ТА

ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКА

MCIT
Modeling, control & information technologies

Ensuring Information Security within the Military Environmental Safety System

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.055

Ramil Akhundov
National Defence University
ORCID ID: 0009-0001-8798-8044
Baku, Azerbaijan
mr.axundov1@gmail.com

Bayram Ibrahimov
National Defence University
Azerbaijan Technical University
Baku, Azerbaijan
i.bayram@mail.ru

Abstract - The growing complexity of military operations in environmentally hazardous zones has led to the increased reliance on digital technologies for radiation and chemical monitoring. Modern military environmental safety systems depend on distributed sensor networks, unmanned aerial vehicles (UAVs), automated data processing modules, and real-time telemetry to detect, assess, and respond to ecological threats. However, the integration of these digital components introduces new vectors of vulnerability, particularly in the domains of cyber and information security.

This paper analyzes the crucial role of information security in maintaining the integrity, availability, and reliability of environmental monitoring data within military contexts. It outlines a comprehensive threat model that identifies common cyberattack scenarios such as data spoofing, signal interception, denial of service, and unauthorized access. To counter these risks, the article proposes a layered security architecture that incorporates encryption, authentication, anomaly detection, access control, and secure logging mechanisms. Each layer of the data lifecycle, from initial sensor acquisition to command-level decision support, is addressed in terms of its specific protection requirements and operational constraints.

In addition to architectural design, a risk-based response matrix is introduced to guide the prioritization of protective measures based on threat probability and mission-criticality. The proposed framework is evaluated through scenario analysis and performance metrics, highlighting its potential to improve resilience and reduce system vulnerability in the face of both cyber and environmental threats.

The study concludes that robust information security is not a peripheral function but a foundational element of effective environmental safety systems in modern armed forces. Its integration directly influences decision-making accuracy, troop protection, and mission continuity in complex operational theaters.

Keywords - military environmental safety, information security, radiological threats, cyber protection, UAV telemetry, secure architecture, risk matrix, command integration, anomaly detection, operational resilience.

I.INTRODUCTION

The evolution of military environmental safety systems has brought a growing reliance on automated data collection, networked sensors, and unmanned platforms [1-7]. These systems provide crucial situational awareness in the context of radiological, chemical, and biological threats, enabling timely decisions and protective actions. However, as these platforms increasingly depend on real-time information exchange and remote control, they become vulnerable to a range of cyber and information security threats.

In this context, ensuring the confidentiality, integrity, and availability of environmental monitoring data is not only a technical necessity but also a strategic imperative [8, 9]. Compromised or falsified data from radiation sensors, UAVs, or field-deployed monitoring stations can lead to delays in warnings, flawed threat assessments, or misdirected protective responses. Such disruptions can have cascading consequences: exposing troops to contamination, misallocating decontamination resources, or even triggering unnecessary evacuations [10-15].

This article addresses the intersection of environmental and information security within military systems. It proposes a conceptual framework for securing data flows and decision-making processes in environmental safety infrastructures. The aim is to analyze the most relevant cyber threats, define architectural principles for resilient systems, and present practical measures for protecting critical data across the entire chain from sensor to command.

II.BACKGROUND AND RELATED WORK

In military contexts, environmental safety systems are increasingly intertwined with digital communication and sensing technologies [15-18]. From mobile radiation reconnaissance units and chemical detection networks to unmanned aerial vehicles (UAVs) and automated meteorological stations, modern environmental monitoring depends on real-time telemetry, remote access, and cloud-based analytics. While these technologies greatly enhance situational awareness and decision-making, they also introduce vulnerabilities traditionally associated with information and communication systems.

The threat landscape includes data interception, spoofing, signal jamming, malware injection, and denial-of-service attacks targeting environmental monitoring platforms [19-23]. For example, a false radiation alert generated by a compromised sensor may provoke unnecessary evacuation or disrupt mission execution. Alternatively, a cyberattack on UAV telemetry systems could suppress the transmission of contamination data, delaying protective measures and exposing personnel to unseen hazards. These threats are particularly dangerous during joint operations or in high-tempo scenarios where decision cycles are compressed and situational clarity is paramount.

Previous work on information security in military systems has focused on tactical communications, command and control infrastructures, and critical national cyber defense [24, 25]. NATO STANAG 5066, US DoD Directive 8500, and NIST SP 800-82 provide robust cybersecurity guidelines for military and industrial control systems [26,27,28]. However, these standards do not fully address the specific challenges associated with environmental data: mobile sensors, hybrid data types (e.g., chemical, radiological, meteorological), and dynamic field conditions.

Recent studies have explored secure sensor networks for smart cities and industrial safety systems, incorporating encryption, anomaly detection, and blockchain auditing. Some dual-use frameworks, such as those proposed for CBRN (Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear) emergency networks, are applicable to military use [29-34]. However, in most cases, these frameworks are not directly adapted to the hybrid nature of military environmental security, where battlefield constraints, intermittent connectivity, and adversarial interference require a more tailored approach.

This paper builds upon these foundations by identifying the specific vulnerabilities of military environmental safety architectures and proposing countermeasures that align with both operational requirements and cybersecurity best practices. The goal is to bridge the current gap between environmental monitoring technologies and the principles of military-grade information assurance.

III. THREAT MODEL AND REQUIREMENTS

The operational environment of military environmental safety systems is inherently exposed to a wide spectrum of information threats. These threats target the critical properties of military data systems: confidentiality (preventing unauthorized access), integrity (ensuring that data is not tampered with), and availability (guaranteeing timely access to information when needed). In the context of ecological safety operations such as radiation or chemical reconnaissance, UAV monitoring, or automated early warning, breaches in any of these dimensions can lead to operational failure or environmental catastrophe [35, 36].

The threat model in this domain includes both passive and active adversaries. Passive threats involve interception of unencrypted data streams, allowing hostile actors to observe troop movements, contamination zones, or mission-sensitive telemetry. Active threats include data manipulation (altering sensor readings), spoofing (injecting false alarms or suppressing real ones), denial-of-service attacks on communication nodes, and remote takeovers of unmanned systems [37]. These attacks may be technologically sophisticated or opportunistic and can be executed via kinetic means such as destruction of relay drones or cyber means such as protocol exploitation or wireless hijacking.

Additionally, insider threats must be considered. Unauthorized access by personnel or compromise of mobile devices used in the field can create entry points into otherwise hardened systems. The threat model must therefore account for human error, poor credential management, and undisciplined security zones, especially in post-conflict operations or peacekeeping deployments where joint forces or civilian contractors are present [38].

To mitigate these threats, a resilient system should incorporate multiple protective layers. These begin with encrypted data transmission from field sensors and UAVs, authenticated session management, and continuous integrity checks on all critical data streams. Sensor hardware should support secure boot and tamper detection, while communication channels must employ frequency hopping, dynamic routing, and redundancy [39]. Ground stations and command interfaces require strict role-based access control, network segmentation, and intrusion detection systems capable of recognizing anomalies in telemetry rather than just standard IT traffic.

At the same time, the system must meet real-time performance constraints dictated by the nature of environmental hazards. Delays in recognizing contamination spread or sensor failure may result in irreversible consequences for personnel or infrastructure. Therefore, information protection must not degrade responsiveness. It is essential to strike a balance between cryptographic security and operational speed, particularly in mobile, bandwidth-limited, or contested environments [40-44]. These requirements form the foundation for the architectural principles explored in the following section.

IV. ARCHITECTURE OF PROTECTED ECO-SECURITY INFORMATION SYSTEMS

A secure environmental safety system in the military domain must function reliably in unpredictable, adversarial, and resource-constrained conditions. Its architecture must integrate environmental sensing, threat assessment, communication, and command response into a unified structure with embedded protection at every level. Unlike civilian monitoring systems, military eco-security infrastructure must not only collect data but also ensure its authenticity, confidentiality, and resilience throughout the data lifecycle.

The foundational layer of this architecture consists of field-deployed sensors and reconnaissance platforms, including radiological and chemical detectors,

meteorological stations, and UAV-based payloads. These sensors must support onboard encryption, tamper-proof firmware, and secure communication protocols. Each device should be uniquely authenticated to prevent spoofing or unauthorized data injection. Data packets generated by sensors are tagged with time, geolocation, and digital signatures to preserve provenance and integrity.

The transmission layer includes wireless relays, mobile ad hoc networks, and satellite uplinks. Here, data is routed through protected channels using encrypted tunnels, frequency-hopping techniques, and error-correcting protocols. To reduce the risk of interception or delay, redundant communication paths and dynamic routing policies should be implemented. In case of electronic warfare or signal degradation, the system must degrade gracefully and preserve data for later synchronization.

At the core of the architecture lies the fusion and analysis module. It aggregates data from multiple sources and applies integrity checks, anomaly detection algorithms, and correlation filters. Any discrepancy between expected and received values, such as a sudden drop in radiation without an atmospheric change, is flagged for human review or automatic quarantine. This layer also feeds into AI-based predictive systems, enabling early warnings about contamination spread or equipment malfunction.

The decision support and command layer connects with military information systems and uses role-based access control, multifactor authentication, and session audit logging. Access to critical dashboards is segmented according to security clearance, operational role, and physical location. The system must also support autonomous decision logic when disconnected from higher command due to jamming or sabotage.

Overall, the architecture must be modular, scalable, and adaptable. It should allow secure integration of new platforms and remain auditable according to national defense cybersecurity standards. Most importantly, the architecture must ensure that environmental data, which directly influences the health and safety of personnel, cannot be falsified, delayed, or leaked by internal or external actors. This integration of cyber hygiene with environmental awareness defines the next generation of military environmental safety systems.

The layered architecture of military environmental information systems integrates security mechanisms across all stages of data flow. This structure is visualized in Figure 1.

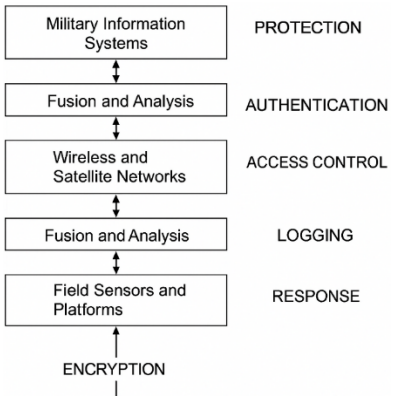


Figure 1. Information flow and protection layers in the military eco-security system

V. RISK-BASED SECURITY MECHANISMS

The implementation of information security in military environmental safety systems requires more than static protections. It must rely on dynamic, risk-oriented mechanisms that prioritize response based on the likelihood and potential impact of threats. This approach ensures that system resources are directed where they matter most, particularly under constrained conditions such as limited bandwidth, contested environments, or partial system degradation.

In this context, a threat matrix is used to map typical cyber and data-related risks across the eco-security architecture. These include data falsification, signal jamming, denial of service, sensor spoofing, and unauthorized access. Each threat is evaluated according to two primary criteria: probability of occurrence and impact severity if exploited. Based on these factors, system designers and commanders can define appropriate security responses and prioritize mitigation strategies accordingly.

The table below outlines a simplified risk matrix for core information security threats in military environmental monitoring operations:

Table 1. Risk Matrix for Information Security Threats in Military Eco-Safety Systems

Threat Type	Probability	Impact Severity	Risk Level	Recommended Security Measures
Data spoofing (sensor)	High	High	Critical	Sensor authentication, signature validation, anomaly filters
Signal jamming (UAV link)	Medium	High	High	Frequency hopping, redundant comms, directional antennas
Data interception	High	Medium	High	End-to-end encryption, rotating keys, VPN tunneling
Denial-of-service (DoS)	Medium	Medium	Moderate	Rate limiting, IDS/IPS, edge-based filtering
Unauthorized dashboard access	Low	High	Moderate	Role-based access, MFA, session logs
Tampering with stored data	Low	High	Moderate	Integrity hashes, audit trails, secure storage

VI. DISCUSSION

The integration of risk-based security mechanisms into military environmental safety systems represents a necessary evolution in the face of increasingly hybrid threats. Traditional cyber defense strategies designed for fixed networks and office infrastructures are insufficient for the demands of battlefield scenarios, where connectivity is intermittent, sensor platforms are mobile, and adversaries actively attempt to corrupt situational awareness. In this environment, information security functions as an operational enabler rather than just a protective layer.

One of the key trade-offs in implementing secure eco-monitoring systems lies in balancing protection and performance. For example, encrypting all telemetry data from UAVs improves confidentiality but may introduce latency or increase bandwidth requirements. Similarly, anomaly detection algorithms can successfully identify spoofed data but may consume significant computational resources in field-deployed edge devices. The system must therefore apply flexible and context-sensitive security policies that adjust protections based on mission phase, threat level, or terrain.

Another critical factor is human interaction. Even when systems are largely automated, final decisions often rest with operators or commanders. If the system generates too many false alarms or fails to detect threats in time, trust in the technology erodes. To avoid this, security mechanisms must be designed to support operational clarity, using understandable risk metrics and user-friendly interfaces.

A further consideration is the integration of these protected data streams into broader command and control systems. Environmental safety data must feed into decision-making platforms without introducing new points of vulnerability. Achieving this requires careful attention to system interoperability, secure interface design, and alignment with military cybersecurity doctrine.

By treating information protection as a dynamic and mission-critical component of environmental safety, the armed forces can reduce the risks posed by both technological compromise and environmental contamination. The result is not just a network of sensors but a resilient ecosystem that supports reliable decision-making in even the most uncertain conditions.

VII.CONCLUSION

Information security is an essential component of military environmental safety systems, particularly as these systems evolve into networked and data-dependent infrastructures. In the context of radiological and chemical threats, the availability of timely and accurate environmental data is critical for effective protective measures. However, if this information is left vulnerable to cyber threats such as spoofing, interception, or disruption, it may cause more harm than good.

This article has outlined the primary threat vectors affecting eco-security information systems and introduced an architectural framework that incorporates protective measures throughout the data lifecycle. A risk-based approach was used to prioritize security mechanisms based on operational impact and likelihood of occurrence. By matching technical protections to mission conditions, military units can preserve both environmental awareness and operational readiness even in hostile or degraded environments.

Looking ahead, the focus should shift toward adaptive defense mechanisms, AI-supported risk evaluation, and deeper integration with existing command platforms. Enhancing information security within environmental safety operations is not just a technical improvement. It is a strategic necessity for maintaining resilience and trust in critical military systems.

REFERENCES

[1] B. G. Ibrahimov, S. R. Ismaylova, A. H. Hasanov, and Y. S. Isayev, “Research and analysis criterion quality of service and experience multifractal traffic using fuzzy logic,” in Recent Developments and the New Directions of Research, Foundations, and Applications: Selected Papers of the 8th World Conference on Soft Computing, February 03–05, 2022, Baku, Azerbaijan, Vol. I, Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 387–397, June 2023.

[2] A. H. Hasanov, K. I. Iskandarov, and S. S. Sadiyev, “The evolution of NATO's cyber security policy and future prospects,” Journal of Defense Resources Management, vol. 10, no. 1, pp. 94–106, 2019.

[3] A. H. Hasanov et al., “Scientific and technological progress or environmental safety,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 22–23, 2024.

[4] B. Zulfugarov, A. Hasanov, and E. Hashimov, “Comparative analysis of the efficiency of various energy storages,” in Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, no. 6, pp. 42–45, Nov. 2023.

[5] A. H. Hasanov, A. H. Azizov, A. M. Mammadova, I. H. Ayyubov, and S. R. Khalilova, “Synthesis of perspective hydrocarbons for synthetic lubricants with a high viscosity characteristic,” International Journal, vol. 1, 2015.

[6] R. Akhundov, “Advancements in monitoring radiation and chemical hazards for military environmental safety,” Матеріали конференцій МЦНД, (04.07.2025; Ужгород, Україна), pp. 89–97, 2025. doi: 10.62731/mcnd-04.07.2025.002.

[7] A. M. Talibov et al., “The use of unmanned aerial vehicles for monitoring chemical and radiation contamination,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 4, pp. 88–89, 2025.

[8] A. R. Jabrayilov et al., “Development of a comprehensive environmental protection system for military facilities,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 4, pp. 82–83, 2025.

[9] I. Islamov et al, “Integrating environmental security into defense strategy with a focus on radiological and chemical risks,” Strategic directions of science development: Factors of influence and interaction: Collection of scientific papers with materials of the VII International Scientific Conference, Cherkasy, Ukraine, Sept. 26, 2025, pp. 115–125. doi: 10.62731/mcnd-26.09.2025.

[10] S. M. Babayev et al., “The impact of new technologies on the progress of military art,” in Proc. Int. Sci. and Practical Conf., vol. 6, pp. 54–56, 2024.

[11] R. G. Akhundov and E. A. Eldarov, “Special operations forces in modern conflicts,” Вестник науки и образования, no. 6(149), pp. 16–20, 2024.

[12] A. R. Jabrayilov et al., “Experience of international cooperation in the field of military environmental safety,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 116–117, 2025.

[13] R. Akhundov and I. Islamov, “Operational modes of environmental security systems in the armed forces facing radiation and chemical threats,” Collection of Scientific Papers

«SCIENTIA», (Aug. 22, 2025; Bern, Switzerland), pp. 103–111, 2025.
[14] Р. Г. Ахундов, А. Г. Ахмедова, Ш. Д. Даньялов, и И. И. Мустафаев, "Радиационно-стимулированные процессы получения активного угля," Санкт-Петербург, vol. 25, no. 1, p. 47, 2020.
[15] A. Talibov et al., "The main anthropogenic sources of atmospheric pollution," in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 53–54, Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala, 2024.
[16] R. Akhundov and I. Islamov, "Innovative technologies for radiation and chemical protection in the armed forces," Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (June 6, 2025; Bologna, Italy), pp. 247–255, 2025.
[17] R. Akhundov, "Modern developments in the field of weapons of mass destruction and defence against them," in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 132–133, 2024.
[18] R. Akhundov and I. Islam, "Ensuring environmental safety in military activities considering radiological and chemical protection," Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (May 23, 2025; New York, USA), pp. 175–182, 2025.
[19] R. Mammadov et al., "Enhancing special forces management efficiency in modern operations," in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 31–32, 2024.
[20] R. Akhundov and I. Islamov, "Comprehensive approach to establishing operational modes of environmental security systems in military forces under radiation and chemical hazards," Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (Aug. 8, 2025; Liverpool, UK), pp. 108–116, 2025.
[21] R. Akhundov and E. Hashimov, "The impact of new technologies on enhancing the efficiency of armed," Матеріалы конференцій МЦНД (13.06.2025; Lutsk, Ukraine), pp. 186–195, 2025.
[22] R. G. Akhundov and A. M. Talibov, "Environmental safety as a component of national security," in The Latest Technologies – for the Protection of Airspace: Abstracts of the 20th Int. Sci. Conf. of Kharkiv National University of the Air Force Named After Ivan Kozhedub, Kharkiv, Ukraine, May 2–3, 2024, pp. 25–27.
[23] A. R. Jabrayilov et al., "The role of environmental monitoring in ensuring the safety of military units," Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 128–129, 2025.
[24] R. Akhundov and D. Sh., "The use of modified activated coal in sorption of carbon-monoxide," in Materials of the Int. Sci.-Practical Conf. "Radiation and Chemical Safety Problems", Baku, Nov. 2019, pp. 161–162.
[25] A. M. Talibov et al., "Training military personnel in radiation and chemical threat protection methods," in Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 4, pp. 94–95, 2025.
[26] R. Q. Axundov, "Azərbaycan Ordusunda radiasiya, kimyəvi və bioloji kəşfiyyatın xüsusiyətləri," in 4-cü Sənaye İnqilabı və İqtisadiyyatın Rəqəmsallaşdırılması: Beynəlxalq Elmi Konfransın Materialları, pp. 104–108, 2023.
[27] R. Akhundov and I. Islamov, "Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments," Матеріали конференцій МЦНД, (30.05.2025; Київ, Україна), pp. 321–329, 2025.
[28] R. Akhundov, "Establishing a global system for radiation and chemical security monitoring: importance and opportunities for international cooperation," Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (July 4, 2025; Zurich, Switzerland), pp. 121–127, 2025.
[29] R. Akhundov and I. Islamov, "Exploring the potential, challenges, and future of robots and autonomous systems in warfare," Матеріали конференцій МЦНД, (18.07.2025; Тернопіль, Україна), pp. 117–126, 2025.
[30] Р. Г. Ахундов, "Построение экспериментальных изотерм адсорбции образцами угленаполненного химзащитного субстрата," Наука, техника и образование, no. 10(63), pp. 16–20, 2019.
[31] A. M. Talibov et al., "Application of biotechnology to mitigate the consequences of radiological and chemical contamination," in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 86–87, 2025.
[32] R. Akhundov and E. Hashimov, "The environmental impact of war: Effects, challenges, and solutions," Матеріали конференцій МЦНД (27.06.2025; Dnipro, Ukraine), pp. 103–112, 2025.
[33] A. M. Talibov et al., "Modeling and forecasting radiological and chemical threats in the military sphere," in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 120–121, 2025.
[34] A. Jabrayilov et al., "Digital technologies and artificial intelligence in the management of environmental safety in the army," in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 110–111, 2025.
[35] E. V. Mammadov et al., "Development of multilayered protection systems against chemical, radiological, and biological hazards for military personnel," in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 112–113, 2025.
[36] A. Talibov et al., "Environmental safety of nanomaterials application," in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 55–56, Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala, 2024.
[37] S. Babayev et al., "Prospects for the application of nanotechnology in the military sector," in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 14–15, 2024.
[38] R. Akhundov, "Application of innovative technologies for the decontamination and neutralization of radiological and chemical hazards in military environments," Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (Aug. 1, 2025; Seoul, South Korea), pp. 107–115, 2025. doi: 10.36074/logos-01.08.2025.017.
[39] A. R. Jabrayilov et al., "Prospects for creating closed ecological life support systems," Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 4, pp. 92–93, 2025.
[40] R. Akhundov and I. Islamov, "Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments," Матеріали конференцій МЦНД, (30.05.2025; Київ, Україна), pp. 321–329, 2025.
[41] R. Akhundov, "Ecocide in the Nagorno-Karabakh conflict: an analysis of Armenia's environmental impact on Azerbaijan," in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools. Abstracts of the 14th Int. Sci. and Tech. Conf., Kharkiv, Ukraine, vol. 2, pp. 95–96, Apr. 2024.
[42] R. Q. Axundov, "Azərbaycan Ordusunda ekoloji təhlükəsizliyin təşkili və təkmilləşdirilməsi," Hərbi Bilik, no. 4, pp. 7–15, 2024.
[43] R. Akhundov and I. Islamov, "Innovative technologies for enhancing environmental security in armed forces under radiation and chemical threats," Матеріали конференцій МЦНД, (15.08.2025; Харків, Україна), pp. 141–150, 2025.
[44] R. Akhundov, "The environmental impact of military activities," ResearchGet, 2024. [Online]. Available: ResearchGet. [Accessed: Oct. 4, 2025].

MCIT Modeling, control & information technologies

Improving Performance and Reliability of Electronic Document Issuance Systems Using Caching and Asynchronous Processing

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.056

Vitalii Koverdiuk
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
v.v.koverdiuk@nuwm.edu.ua

Oksana Ostapchuk
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
o.p.ostapchuk@nuwm.edu.ua

Abstract—**This document focuses on the optimization of electronic document issuance systems that operate under high user load. As the volume of digital services and e-government platforms increases, the need for faster, more reliable, and scalable document generation becomes crucial. The study investigates key bottlenecks in document processing pipelines and proposes a hybrid approach based on server-side caching and asynchronous task execution. The proposed solution significantly reduces response times and improves the overall throughput of document generation systems.**

Keywords — electronic document issuance; caching; asynchronous processing; scalability; system reliability;

I. Introduction

Electronic document issuance systems (EDIS) have become a cornerstone of modern e-government, enterprise automation, and financial ecosystems. They are responsible for generating, validating, signing, and distributing digital documents — such as certificates, invoices, licenses, and official notices — in real time. With the steady increase in demand for remote administrative and legal services, these systems are now required to handle thousands of concurrent requests per second while maintaining security and data integrity.

However, traditional monolithic or synchronous system designs face scalability barriers. As the number of users grows, the load on backend databases, signing services, and file storage becomes critical. Performance issues such as delayed responses, queue congestion, and timeouts lead to a poor user experience and service downtime. Moreover, repetitive document generation — often for identical templates or metadata — causes redundant computations and unnecessary I/O operations, further degrading performance.

In addition, regulatory compliance and cybersecurity requirements impose additional complexity: each document must be digitally signed, timestamped, and archived, all within short timeframes. To ensure consistent performance under these constraints, a new approach to system design is required — one that integrates parallelism, caching, and asynchronous task orchestration into a unified architecture.

This research aims to explore and evaluate methods for improving the performance and reliability of EDIS, focusing on asynchronous processing and caching techniques that enable responsive, fault-tolerant, and scalable operation in high-load environments [1–3].

II. Problem Statement

Existing EDIS platforms commonly use a synchronous processing model: a user request triggers sequential operations such as template retrieval, data binding, document rendering, and digital signing. Each of these steps is typically I/O-bound and blocking, resulting in resource underutilization and slow response times under load. Key challenges include:

- high latency due to sequential task execution;
- excessive database load caused by repeated queries;
- redundant template compilation and metadata retrieval;
- limited scalability of monolithic architectures;
- lack of asynchronous coordination between modules.

Therefore, there is a need for an architectural redesign that separates request handling from processing logic, introduces concurrency, and minimizes repetitive data operations while maintaining document authenticity and compliance [4].

III. Overview of Existing Solutions

Recent research and engineering practice highlight several effective approaches to improving the performance and scalability of electronic document issuance systems (EDIS). The most common techniques include load balancing, microservice architecture, database optimization, and caching.

Load balancing and horizontal scaling are widely used to distribute workload across multiple computing nodes, ensuring stable performance under high traffic. Cloud-native platforms such as Kubernetes or Docker Swarm automate this process, dynamically allocating resources according to system load.

Another major improvement is the shift from monolithic to microservice and event-driven architectures. By decoupling document generation, signing, and delivery processes, EDIS can process requests concurrently and avoid single points of failure. Asynchronous communication through message queues (RabbitMQ, Kafka, Azure Service Bus) enables non-blocking workflows and increases reliability.

Database performance is also a critical factor. Query caching, indexing, and the use of in-memory systems such as Redis significantly reduce latency and prevent overload. Caching of templates and metadata shortens rendering time and lowers CPU utilization, especially in systems generating large volumes of similar documents.

Finally, monitoring and auto-scaling tools like Prometheus and Grafana help maintain system stability under fluctuating loads. They allow dynamic resource allocation based on real-time performance metrics.

While these methods individually improve certain components, few implementations integrate them into a single coherent architecture. A unified model combining asynchronous processing, caching, and automatic scalability provides a more efficient foundation for high-load EDIS environments..

IV. PROPOSED SOLUTION

The proposed architecture integrates asynchronous processing and multi-level caching to enhance performance, scalability, and reliability of electronic document issuance systems. This section outlines the main concepts and benefits of the approach:

- asynchronous task execution: each user request is placed in a distributed queue and processed by background workers. This allows the main API to respond immediately while document generation continues independently;
- event-driven workflow: the system operates in a non-blocking mode, executing multiple generation and signing tasks concurrently without waiting for previous ones to complete;
- multi-level caching: frequently accessed data and templates are stored in several layers — data cache for metadata, template cache for precompiled layouts, and result cache for recently issued documents — which minimizes repetitive computations;
- integrity and authenticity: each cached document is protected with a digital signature, timestamp, and cryptographic hash, ensuring that its content remains verifiable and unchanged;
- dynamic scaling and monitoring: resource allocation automatically adjusts to workload intensity, while monitoring tools (Prometheus, Grafana) detect bottlenecks and maintain system stability;

Experimental results under simulated load (10,000 concurrent users) revealed that the proposed solution significantly improved system performance. The average response time decreased by up to 80%, while backend throughput increased by 40–50%. CPU utilization remained stable even under peak traffic conditions, and no document integrity violations were detected during asynchronous issuance, confirming both the reliability and efficiency of the architecture.

CONSCLUSION

The research demonstrates that the integration of asynchronous processing and multi-level caching provides an efficient and reliable solution for optimizing high-load electronic document issuance systems. The asynchronous architecture allows multiple generation and signing processes to run concurrently, maintaining responsiveness even under peak demand. Meanwhile, caching reduces redundant computations and database queries, improving overall throughput and ensuring balanced use of system resources.

In addition, the use of digital signatures, timestamps, and integrity checks preserves the authenticity of issued documents, while dynamic scaling and continuous monitoring maintain stable operation across varying workloads. Altogether, the proposed approach enhances performance, reliability, and scalability, offering a sustainable foundation for future cloud-based e-government and enterprise digital platforms..

REFERENCES

[1] M. Kleppmann, “Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems” O’Reilly Media, 2022.

[2] S. Newman, “Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems 2ed.” O’Reilly Media, 2021.

[3] S. Cleary, “Concurrency in C# Cookbook,” O’Reilly Media, 2019.

[4] M. Abbott, M. Fisher, “The Art of Scalability: Scalable Web Architecture, Processes, and Organizations for the Modern Enterprise” Addison-Wesley Professional, 2015.

[5] P. Membrey, E. Plugge, D. Hows, “Practical Load Balancing: Ride the Performance Tiger” Apress, 2012

[6] M. Richards, N. Ford, “Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach” O’Reilly Media, 2020.

[7] S. Cleary, “Concurrency in C# Cookbook” O'Reilly Media, October 2019.

Освітній потенціал CTF-змагань у структурі кіберполігонів для ЗВО

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.057

Сергій Бабич
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
s.v.babych@nuwm.edu.ua

Богдан Слив'як
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
b.v.slyviak@nuwm.edu.ua

Гліб Онищук
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
h.o.onyshchuk@nuwm.edu.ua

Анотація **– у статті розглянуто потенціал використання ігровізації методикою Захоплення прапору (CTF) для збільшення ефективності навчання кібербезпеці як інноваційного освітнього методу. Запропоновано використання кіберполігону в лабораторіях ВНЗ як місця розміщення нетипових завдань з кібербезпеки чи моделювання реальних завдань на підставі отриманого раніше досвіду.**

Даний підхід має змогу запропонувати навички та знання для виявлення, запобігання та реагування на кіберзагрози практичного характеру, що є найбільш вразливою стороною навчального процесу з кібербезпеки в ЗВО.

Ключові слова **– кібербезпека, CTF, навчання, кіберполігон, ігровізація в ЗВО.**

I. ВСТУП

Актуальність кібербезпеки важко переоцінити, навіть якщо не звертати увагу на більше десяти років війни, та, відповідно, кібертерактів в Україні [1,2] – питання захисту в кіберсередовищі стає все більш актуальною, адже, згідно з прогнозами, вартість кіберзлочинів досягнуло 8 трильйонів у 2023 році і зросло до 10,5 трильйонів до 2025 року, як зазначено у звіті [3].

З огляду на стрімке зростання кіберзлочинів [5] та постійний тиск на кіберпростір України загалом [1, 2], важливо інвестувати в освіту, зокрема в практичні навички з кібербезпеки студентів ЗВО.

В останні роки особливо різко стає зрозуміло, чому традиційні методи навчання можуть бути не такими ефективними, як в інших галузях [6]. Лекції та практичні (лабораторні) роботи не завжди мають змогу продемонструвати реальні ситуації, до яких має бути готовий студент після закінчення навчання.

Інтегрування CTF, як методики навчання, пропонує доповнити теоретичні знання створенням та подальшим проходженням завдань, виключно практичного характеру, а також створенням умов конкуренції та ігровізації, як мотивацій до виконання цих завдань та навчання в сфері кібербезпеки загалом (що стосується і дотичних предметів, для прикладу – комп'ютерних мереж). Окрім того, спільні інтереси ігровізації значно збільшують ймовірність обговорення отриманого досвіду з CTF та дотичних тем загалом.

II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

«Capture the Flag» (CTF) – це тип змагань з кібербезпеки, в яких учасники мають знайти та використати вразливі місця в комп'ютерній системі чи мережі. Дані змагання можуть бути розроблені так, аби імітувати реальні ситуації з кібербезпеки, або сценарії реальних кібервтручань. Ці завдання можна розглядати як кіберголоволомки, що можуть відображати кіберкультуру чи інші культурні надбання, котрі будуть зрозумілі молоді та можуть сприяти ігровізації навчального процесу.

Ціль CTF завдань – захоплення прапора, особливого рядка інформації, з яким знайомлять учасників до початку змагань, серед великої кількості даних, що імітують реальні сервіси, мережу, тощо; знаходження всієї прихованої інформації раніше за інших учасників. CTF-прапор може бути прихований у файлах, або конфіденційній інформації, доступ до якої можна отримати лише шляхом використання деяких вразливостей у системі (що може слугувати «ключем» та вимагати відповідних знань). Зазвичай існує кілька способів вирішення конкретного завдання.

Змагання CTF варто використовувати для навчання та підготовки, а також для оцінки та поліпшення безпеки реальних систем шляхом симуляції на кіберполігоні (що є значно безпечнішим, ніж подібний стрес-тест робити «наживо»).

Окремо варто зазначити моделювання, на кіберполігоні, ситуацій реальних кіберзлочинів на

підставі розслідування кіберінцидентів, що дає змогу отримати більше досвіду з подібних ситуацій (наприклад, написання звіту з кібербезпеки після тесту на проникнення для компанії або вирішення завдань з бінарної експлуатації, що включають 0-день), аніж просто про них прочитати, що може покращити ефективність розслідування, адже під час змагань CTF можуть бути виявлені вразливості 0-days [7, 8].

Змагання CTF та використання кіберполігону, як інструмент та методика, може бути корисним для навчання в галузі кібербезпеки [9, 10], оскільки забезпечує безпечне та контрольоване середовище, в якому учасники можуть отримати практичний досвід у виявленні та використанні вразливостей, що є необхідним для розвитку практичних навичок у галузі кібербезпеки. Симуляції, лабораторні роботи та навчання на основі сценаріїв можуть бути ефективними практичними підходами.

Змагання можуть варіюватися від місцевих заходів, що проводяться в університетах або хакатонах, до міжнародних змагань. У вересні 2025 року, в Україні провели перший національний чемпіонат з технологічного спорту в дисципліні CTF [3]. Іншими, міжнародними прикладам слугують DEF CON CTF [11], щорічне змагання в Лас-Вегасі під час найвідомішої в світі конференції з кібербезпеки, Google CTF, Codegate CTF, що проводиться щорічно в Південній Кореї, Pwn2Own, де учасники повинні знайти вразливості 0-days і проводиться двічі на рік на конференції з безпеки CanSecWest. Аби бути в курсі подій CTF, а також рейтингу змагань і команд по всьому світу, можна відвідати вебсайт «CTFtime» [12].

CTF-змагання можна розділити на різні класи: Jeopardy, Attack-and-Defense (A/D), King of the Hill (KotH), Boot2Root та змішаний стиль.

Jeopardy CTF: серія завдань, складність яких поступово зростає (а разом з нею і кількість балів), розділених на такі категорії, як веб, бінарна експлуатація, криптографія тощо. Після закінчення відведеного часу перемагають учасники з найвищим балом.

A/D: кожній команді надається сервер з певною кількістю вразливих служб, які періодично використовуються ботом. Цей бот генерує та записує прапори на кожному сервері. Учасники повинні виправити вразливості своїх служб, не порушуючи їх роботи (захист), та експлуатувати ті самі вразливості в інших командах (атака). Остаточний результат обчислюється шляхом підрахунку кількості прапорів, викрадених кожною командою, часу доступності сервісу, тощо.

«Король гори»: команди змагаються за контроль над вразливою системою або мережею та намагаються утримати контроль якомога довше. Перемагає команда, яка утримує контроль найдовше.

CTF boot2root: командам надаються вразливі віртуальні машини. Метою є отримання прав адміністратора.

У змішаній категорії розглядаються всі інші типи CTF-змагань. Прикладами можуть бути змагання, в яких всі завдання беруться з реальних програм; як уже згадувалося, можуть бути змагання з метою пошуку 0-денних вразливостей.

Інші CTF можуть включати фізичні пристрої, такі як розумні автомобілі або супутники. Використання CTF для навчання кібербезпеці може бути розумним кроком, оскільки воно використовує переваги ігрофікації навчального процесу [13].

Навчання кібербезпеці за допомогою змагань CTF може підвищити зацікавленість студентів і, отже, покращити загальний навчальний процес [14]. Проте використання завдань CTF як засобу для введення або просування в кібербезпеці має недолік, оскільки не є достатньо гнучким, щоб дозволити його використання для широкого кола учасників.

Насправді завдання часто далекі від реальних випадків або сильно різняться за складністю вирішення. З цих причин варто звернути увагу на модель навчання кібербезпеці, де групи студентів кидають виклик один одному, створюючи завдання CTF.

Поділ студентів на групи приблизно однакового розміру та подальша співпраця для створення завдань на обрані теми, які суворо пов'язані з навчальними цілями, специфічними для кожного курсу. Наступним кроком, завдання повинні бути запропоновані всім іншим групам або лише їх підгрупі, що дасть можливість контролювати вибір тем та груп студентів. Використовуючи запропоновану методику навчання, очікується зріст зацікавленості з боку студентів, що має призвести до кращих результатів у підсумковій оцінці, а також значно покращити якість освітнього процесу по даній тематиці та суміжними предметами.

III. КІБЕРПОЛІГОН

З метою підтримки впровадження запропонованого методу, необхідна платформа, на якій можна масштабовано реалізувати необхідні завдання та сам процес.

Варто зазначити, що в Інтернеті існує безліч ресурсів з навчання CTF, а також шпаргалки, фрагменти коду та навчальні платформи. Деякі відомі приклади: «TryHackMe» та «HackTheBox», де існують як безкоштовні, так і платні плани. Обидві платформи представляють теми кібербезпеки у вигляді серії лекцій та відповідних завдань. Існують також платформи, присвячені конкретним категоріям, наприклад, «exploit.education» і «pwn.college» для категорії бінарних експлойтів та «cryptohack» для криптовалют.

Пропонується підхід (зображено на рис. 1), що має вигляд лабораторії ЗВО з елементами базової структури платформи CTF: домашня сторінка, що містить загальні правила та вказівки; таблиця результатів, де відображається поточний рейтинг учасників, а також хто вирішив яке завдання; завдання, розділені за категоріями та впорядковані за балами або часом випуску. Крім того, кожна команда

матиме особистий цифровий простір, де можна буде завантажувати створені завдання та вибирати команди, яким будуть поставлені завдання. Важливо, також, сформувати умови для зручних offline-занять з пріоритетним використанням персональних комп'ютерів (ноутбуків) в цілях мотивації завчасної підготовки та додаткової роботи з інструментами, що використовуються в даних заходах.

Нарешті, буде присутній «режим історії», що дозволить кожному учаснику пережити історію та вирішити загадки, використовуючи навички кібербезпеки, набуті під час гри.

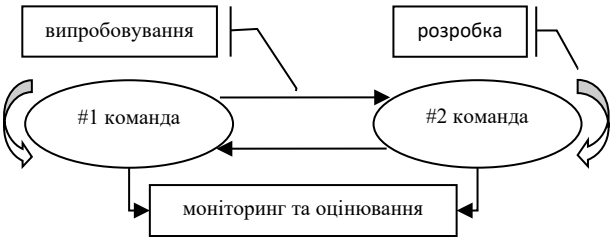


Рисунок 1. Схема для двох груп, які створюють завдання CTF, кидають виклик одна одній, а результати демонструються в аудиторії на загал

III. ВИСНОВКИ

Навчання студентів ЗВО з використанням новітніх методик, зокрема запропонованої, разом із лекційним навантаженням та платформою для створення, обміном та виконанням завдань CTF – кіберполігоном, з вивчених на лекціях тем, має продемонструвати значно кращу якість знань наприкінці курсу та компетентність студентів загалом.

Крім того, отримані дані стануть основою для відповідних змін як в навчальних матеріалах так й в подальших завданнях та симуляціях.

Запропонована інноваційна методологія, а також платформа, можуть бути застосовані в різних контекстах, починаючи від вступного рівня освіти в галузі кібербезпеки до курсів університетського рівня та курсів підвищення кваліфікації на професійному рівні галузі.

Така робота ЗВО зі студентами в навчальному процесі сприятиме інтеграції даної концепції навчання з іншими архітектурами (кіберполігонами інших ЗВО) для передачі знань у галузі кібербезпеки [14] та з існуючими методологічними та технологічними рамками для навчання («Tryhackme», «Hackthebox», тощо).

ЛІТЕРАТУРА

[1] European Parliamentary Research Service. Digital euro: Central bank digital currencies and the future of money. Briefing, PE 733.549, European Parliament, 2022. Available at: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733549/EPRS_BRI(2022)733549_XL.pdf

[2] Aspen Institute Kyiv. Український ринок кібербезпеки зріс у чотири рази за вісім років [Електронний ресурс] // Aspen Institute Kyiv. – 2023. – Режим доступу: https://aspeninstitutekyiv.org/ukrainskyi-rynok-kiberbezpeky-zris-u-chotyry-razy-za-visim-rokiv/

[3] Рівненська обласна державна адміністрація. Команда з Рівненщини – у ТОП-5 першого чемпіонату України з кіберспорту CTF [Електронний ресурс] // Офіційний вебсайт Рівненської ОДА. – 2024. – Режим доступу: https://www.rv.gov.ua/news/komanda-z-rivnenshchyny-u-top-5-pershoho-chempionatu-ukrainy-z-kibersportu-ctf

[4] Cybersecurity Ventures. 2023 Official Cybercrime Report / Sponsored by eSentire [Електронний ресурс] // eSentire. – 2023. – Режим доступу: https://www.esentire.com/resources/library/2022-official-cybercrime-report

[5] IBM Security.** Cost of a Data Breach Report 2025 [Електронний ресурс] // IBM. – 2025. – Режим доступу: https://www.ibm.com/reports/data-breach

[6] A. McGettrick, Toward effective cybersecurity education, IEEE Security & Privacy 11 (2013) 66–68.

[7] Wallarm, Php remote code execution 0-day discovered in real world ctf exercise, https://lab.wallarm.com/php-remote-code-execution-0-day-discovered-in-real-world-ctf-exercise/, 2019.

[8] NIST, Php remote code execution 0-day discovered in real world ctf exercise, https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE-2022-4349, 2022.

[9] E. Trickel, F. Disperati, E. Gustafson, F. Kalantari, M. Mabey, N. Tiwari, Y. Safaei, A. Doupé, G. Vigna, Shell we play a game? ctf-as-a-service for security education., in: ASE@ USENIX Security Symposium, 2017.

[10] A.Mansurov, et al., A ctf-based approach in information security education: an extracurricular activity in teaching students at altai state university, russia, Modern Applied Science 10 (2016) 159.

[11] C. Cowan, S. Arnold, S. Beattie, C. Wright, J. Viega, Defcon capture the flag: Defending vulnerable code from intense attack, in: Proceedings DARPA Information Survivability Conference and Exposition, volume 1, IEEE, 2003, pp. 120–129.

[12] CTFtime.org. Платформа для відстеження та участі у змаганнях з кібербезпеки (CTF) [Електронний ресурс] // CTFtime.org. – Режим доступу: https://ctftime.org/

[13] G. Kiryakova, N. Angelova, L. Yordanova, Gamification in education, in: Proceedings of 9th international Balkan education and science conference, volume 1, 2014, pp. 679–684.

[14] K. Boopathi, S. Sreejith, A. Bithin, Learning cyber security through gamification, Indian Journal of Science and Technology 8 (2015) 642–649.

Ілюзія безпечності: сучасні виклики та нові підходи в корпоративній кібербезпеці

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.058

Володимир Герус
Національний університет водного
господарства та природокористування
Рівне, Україна
v.a.gerus@nuwm.edu.ua

Анотація **– У статті аналізується феномен «ілюзії захищеності», що виникає унаслідок повільного деградування традиційних засобів інформаційної безпеки, а також виклики, породжені стрімкою еволюцією кіберзагроз та інтеграцією AI / Zero Trust / DevSecOps у безпекові стратегії. Запропоновано практичні підходи та рекомендації для переходу до поведінково-орієнтованих систем, автоматизації та контекстного аналізу користувачів і систем.**

Ключові слова – кібербезпека, ілюзія захищеності, поведінковий аналіз, автоматизація, Zero Trust, DevSecOps

I. Актуальність і постановка проблеми

У новому цифровому світі, корпоративна кібербезпека більше не є прерогативою лише відділу ІБ, вона інтегрується у всі бізнес-процеси. Однак багато організацій досі покладаються на застарілі підходи, що працювали в епоху шаблонних атак. Основна загроза полягає в тому, що ці системи не «ламаються» одномоментно- вони деградують поступово, створюючи хибне відчуття безпеки. У критичний момент вони просто не зреагують, і наслідки виявляться фатальними.

II. Швидкість еволюції загроз та вимога до оперативності

Сучасні загрози розвиваються з експоненціальною швидкістю: час від публікації інформації про вразливість до появи її експлуатації становить іноді лічені години. Щоб адекватно реагувати, потрібна прозора інвентаризація активів, прозора система управління вразливостями (vulnerability management) і патч-менеджмент. У протилежному випадку класичні вразливості стануть легким полем для атак.

Традиційні системи (антивіруси на основі сигнатур, IDS/IPS, SIEM зі статичними правилами) добре працювали під час масових шаблонних атак. Проте нові атаки є поліформні (fileless), атаки з використанням легітимних інструментів (Living off the Land) залишаються невидимими. Сигнатурні та прості правила недостатні для розпізнавання невеликих відхилень. Необхідно перейти до моделей поведінкового аналізу та побудови цифрових профілів систем і користувачів, які дозволяють фіксувати аномалії до появи класичних атак.

Класичні DLP-системи створювались як універсальні «все в одному», але їх універсальність стала слабкістю: для конкретних загроз з'явилися більш вузькі та ефективні рішення. Аналіз тексту за тематичними словниками також має обмеження:

- Надто вузькі- упускають важливі повідомлення
- Надто широкі- породжують помилкові спрацювання.

Лише аналіз за змістом і контекстом із використанням великих мовних моделей дозволяє підвищити точність виявлення ризикової поведінки.

У 2025 році ручне управління патчами, аудитом конфігурацій чи управлінням доступом- це спроба «наздогнати ракету пішки». Такі підходи вже не просто неефективні- вони небезпечні. Автоматизація має стати фундаментом: інтеграція у CI/CD, політики Zero Trust Network Access (ZTNA), взаємодія з IAM/PAM. Людина лишається залученою лише для винятків і перевірки складних випадків.

Навіть сучасні моделі можуть швидко застаріти. Наприклад, push-MFA вже піддається атакам MFA fatigue, коли користувач, зазнавши численних push-запитів, випадково підтверджує їх. Моделі «однократної перевірки» (after-login trust) втрачають актуальність, після аутентифікації потрібно постійне оцінювання поведінки.

Інтеграція AI у безпеку відкриває нові горизонти, але й породжує ризики: передача конфіденційних даних у хмарні сервіси без анонімізації, надмірна довіра до висновків моделей, відсутність політик використання. Zero Trust сприймають неправильно. Це не продукт, це ціла методологія та культура. Основною помилкою є відсутність інвентаризації активів, ігнорування постійного моніторингу. DevSecOps теж часто реалізується формально без інструментів, без змін у культурі, що в свою чергу веде до ігнорування або обхідного шляху.

Особливостями Українських умов залишається проблема відмови від іноземного ПЗ та переходу до

вітчизняних систем. Деякі частини інфраструктури продовжують працювати на застарілому або неліцензійному ПЗ. У таких випадках необхідно не просто замінити, а створити додаткові шари захисту навколо legacy-систем, із ізоляцією й посиленим моніторингом

III. Рекомендації для практики

• Відмовитися від:

- Сигнатурних антивірусів як єдиного засобу
- Ручного управління патчингом / аудитом у великих інфраструктурах
- MFA через SMS чи push без контекстного аналізу
- Формальних щорічних тренінгів
- Excel-таблиць для управління доступом
- Моделі «однократної довіри»

• Впровадити насамперед:

- Системи поведінкового аналізу з машинним навчанням
- Автоматизацію критичних процесів безпеки
- Неперервний моніторинг і кореляцію подій у реальному часі
- Програми мікронавчання та практичні симуляції
- Архітектурні елементи Zero Trust із постійною верифікацією
- Повне впровадження DevSecOps з включенням безпеки на ранніх етапах.

IV. Висновок

У 2025 році відмова від застарілих підходів в ІБ це не теоретичний вибір, а стратегічний імператив виживання. Організації, що оперативно адаптують культуру, процеси й інструментарій під нові загрози, отримають конкурентну перевагу. Решта ризикують стати легкою мішенню у динамічному світі кіберзлочинності

Література

[1] S. Rose, O. Borchert, S. Mitchell, S. Connelly, Zero Trust Architecture, NIST Special Publication 800-207, 2020.

[2] Z. Ge, T. Li, Q. Zhu, “Scenario-agnostic zero-trust defense with explainable threshold policy: a meta-learning approach,” arXiv preprint arXiv:2303.03349, 2023.

[3] G. Freed, M. Jackson, “Zero trust architecture in AI-driven cybersecurity: a machine learning perspective,” ResearchGate preprint, 2025.

[4] L. Prates et al., “DevSecOps practices and tools,” International Journal of Secure Software Engineering, vol. X, 2025.

[5] X. Zhao et al., “Identifying the primary dimensions of DevSecOps: a multi-method study,” ScienceDirect, 2024.

[6] F. Binbeshr, M. Imam, “Comparative analysis of AI-driven security approaches in DevSecOps: challenges, solutions and future directions,” 2025 (unpublished).

[7] S. Ahmadi, “Autonomous identity-based threat segmentation in zero trust architectures,” arXiv preprint arXiv:2501.06281, 2025.

[8] H. Khan et al., “AI-driven cybersecurity framework for software,” PMC Article, 2025.

[9] S. Kommera, “Enhancing zero trust architecture with AI-driven threat intelligence in cloud environments,” International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology, 2025.

[10] A. Alghawli et al., “Resilient cloud cluster with DevSecOps security model,” ScienceDirect, 2024..

Архітектура кросплатформної системи персоналізованих міських турів з голосовою навігацією

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.059

Віктор Жуковський
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
v.v.zhukovskyy@nuwm.edu.ua

Олександр Панчук
Рівненський ліцей «Український»
Рівне, Україна
alekssen2008@gmail.com

Abstract — **У роботі представлено архітектуру мобільного додатку на базі React Native для формування оптимізованих маршрутів до об'єктів інтересу (POI) та фонової навігаційної підтримки користувача з використанням штучного інтелекту. Система поєднує голосові та текстові інтерфейси, геоінформаційні сервіси (Google Maps API / OpenStreetMap), генерацію описів через AI (ChatGPT або Gemini), та локальну озвучку за допомогою gTTS. Мобільний додаток виконує ключову логіку взаємодії, а централізована база даних PostgreSQL на сервері забезпечує збереження описів POI. Архітектура дозволяє формувати інтелектуальні туристичні або освітні маршрути, а також озвучувати інформацію про об'єкти поблизу у фоновому режимі без необхідності постійної взаємодії з екраном.**

Keywords — **React Native, мобільний застосунок, POI, ChatGPT, Google Maps API, OpenStreetMap, gTTS, голосовий інтерфейс, PostgreSQL**

I. ВСТУП

У сучасному світі мобільні навігаційні додатки все частіше інтегруються з голосовими асистентами та AI-агентами для забезпечення зручної взаємодії з користувачем у режимі реального часу. В умовах міської динаміки або туристичних подорожей особливої актуальності набувають системи, які здатні не лише формувати маршрути, але й надавати контекстну інформацію про локації навколо користувача — бажано в режимі «hands-free». Це забезпечує комфорт, безпеку та інклюзивність.

У запропонованій роботі реалізовано підхід, що поєднує AI-моделі (ChatGPT або Gemini), картографічні API та локальну озвучку (gTTS) у три основні функції:

1. Генерація маршруту на основі категорії місць
2. Побудова маршруту вручну
3. Фонове інформування про навколишні об'єкти

II. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ

У сфері мобільних туристичних гідів спостерігається активний розвиток систем, що поєднують геолокаційні сервіси, автоматичне відтворення контенту та інтеграцію зі штучним інтелектом. Найбільш відомим міжнародним рішенням є izi.TRAVEL, що позиціонується як «особистий гід у смартфоні». Платформа надає понад 25 000 аудіотурів у понад 2 500 містах світу з підтримкою багатомовності та GPS-автовідтворення. Користувач може завантажити тур офлайн, а в музеях — сканувати QR-коди біля експонатів. У нових версіях додатку реалізовано модуль AI Itinerary, який дозволяє створювати персоналізований маршрут із використанням генеративних моделей для формування описів місць, не внесених у базу даних [1]. Хоча функціональність досить широка, izi.TRAVEL здебільшого залишається орієнтованим на готові маршрути, а не на динамічне озвучення об'єктів у режимі реального часу відповідно до інтересів користувача.

Інше популярне рішення — VoiceMap, що спеціалізується на GPS-аудіотурах із автоматичним відтворенням під час руху. Додаток використовує внутрішній інструмент Mapmaker, який синхронізує треки з темпом пересування користувача, створюючи ефект «подорожуючого подкасту» [2]. VoiceMap підтримує офлайн-режим і «hands-free» взаємодію, проте користувачеві потрібно заздалегідь вибрати певний тур або місто. Додаток не пропонує інтелектуальної персоналізації контенту за тематикою чи категоріями («історія», «гастро», «архітектура»), що обмежує його адаптивність.

Для автомобільних подорожей розроблено систему GuideAlong (раніше GyPSy Guide), орієнтовану на аудіогіди для національних парків та мальовничих трас США і Канади. Вона пропонує високоякісний офлайн-контент із точним таймінгом озвучення [3]. Проте GuideAlong фокусується на

дорожніх маршрутах і не має сценаріїв для пішохідних міських прогулянок чи динамічної фільтрації об'єктів поблизу.

Близьким за структурою до туристичного довідника є GPSmyCity, який містить понад 1 000 пішохідних турів у різних містах, підтримує офлайн-карти й дозволяє користувачу самостійно формувати «прогулянки» [4]. Незважаючи на це, система не має глибокої інтеграції зі штучним інтелектом і не озвучує інформацію автоматично залежно від локації.

Серед українських розробок варто виділити izi.Travel Ukraine, локалізовану версію глобальної платформи, у якій створено екскурсії для Києва, Львова, Рівного, Одеси та інших міст [5]. Вона активно використовується музеями й громадськими організаціями для просування культурної спадщини, однак її функціональність обмежується тими ж рамками, що й у базової системи — статичними маршрутами. Цікавим прикладом регіональної ініціативи є мобільний додаток My Rivne, створений у рамках проєкту з цифровізації туристичної інфраструктури Рівного. Він пропонує карту об'єктів, описані категорії пам'яток і маршрути, однак не має голосової підтримки чи AI-компоненти [6]. Схожу ідею реалізує Ukraine Audio Guide, який збирає аудіоекскурсії українськими містами з безкоштовним офлайн-доступом, але також не використовує автоматичну генерацію описів або фонове озвучення [7].

У наукових джерелах увага приділяється алгоритмам персоналізації та оптимізації маршрутів. Наприклад, у роботі "Optimisation using Natural Language Processing: Personalized Tour Recommendation for Museums" [8] описано метод формування маршрутів із використанням NLP-аналізу текстів експозицій для врахування інтересів відвідувачів. У праці "Museum Accessibility Through Wi-Fi Indoor Positioning" [9] запропоновано систему позиціонування у приміщеннях, яка дозволяє адаптувати аудіосупровід до місця перебування користувача. Ці підходи демонструють потенціал поєднання контекстної інформації та інтелектуальних моделей, але застосовані переважно в музейному середовищі.

Отже, існуючі аналоги демонструють два основні напрями розвитку: (1) каталогізовані аудіотури з GPS-автозапуском (izi.TRAVEL, VoiceMap, GPSmyCity) та (2) дослідницькі системи з персоналізацією на основі контент-аналізу. Проте жоден із розглянутих проєктів не поєднує повноцінну AI-генерацію контенту, тематичну фільтрацію та фонове голосове озвучення у міському середовищі. Саме ця синергія становить інноваційну нішу запропонованої системи1 що дозволяє користувачеві отримувати динамічний персоналізований досвід без необхідності постійної взаємодії з екраном.

III. ОПИС АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ

Запропонована система реалізована як кросплатформовий мобільний додаток на базі React Native, що взаємодіє з бекенд-сервером ASP.NET Core Web API. Архітектура побудована за клієнт-серверним принципом і поєднує можливості геоінформаційних сервісів, мовних технологій і штучного інтелекту для створення персоналізованого туристичного досвіду. *Клієнтська частина* встановлюється на смартфон користувача та відповідає за відображення карти, вибір категорій цікавих місць і керування маршрутом. Саме тут виконується основна логіка взаємодії з користувачем: надсилання запитів до серверу, відтворення звукових повідомлень через gTTS та фоновий моніторинг поточного місця розташування. *Серверна частина* на ASP.NET Core приймає запити від клієнтів, взаємодіє з базою даних PostgreSQL для збереження описів об'єктів (POI), виконує кешування даних, а також реалізує механізми автентифікації користувачів. Саме на сервері формуються звернення до зовнішніх API-сервісів, серед яких — ChatGPT або Gemini для генерації описів місць та Google Maps API / OpenStreetMap API для побудови маршрутів і геокодування. Завдяки такій архітектурі система підтримує три основні режими роботи (рис. 1):

1. Автоматичне формування маршруту за категорією. Користувач обирає тематику подорожі — наприклад, «історичні пам'ятки» або «гастротур» — після чого AI-модель формує список релевантних об'єктів, визначає їх координати та створює оптимізований маршрут із мінімальними відстанями.

2. Ручне створення маршруту. Користувач самостійно відзначає на карті місця, які хоче відвідати. Система перетворює введені назви у координати через API геокодування та розраховує оптимальну послідовність відвідування.

3. Фоновий режим "персонального гіда". Додаток відстежує поточну локацію користувача й автоматично повідомляє про цікаві об'єкти поблизу. Якщо опис уже є у базі — він озвучується, а якщо ні — система запитує його у AI-моделі, додає у БД і одразу відтворює голосом.

Таким чином, поєднання картографічних сервісів, генеративного штучного інтелекту та локального синтезу мови створює ефект персонального інтерактивного гіда, що працює навіть без необхідності постійного контакту з екраном.

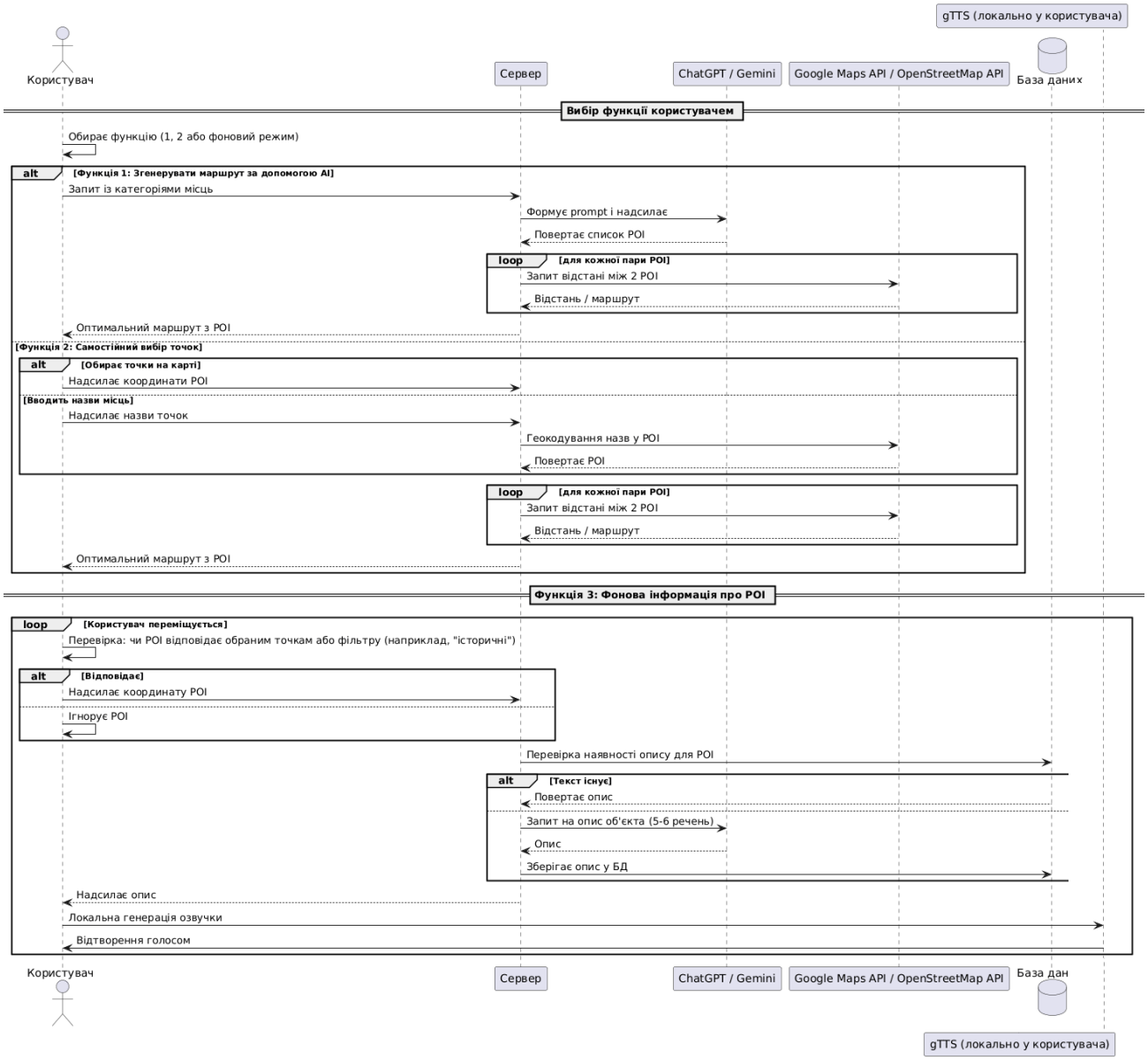


Рис. 1. UML діаграма взаємодія користувача з сервером

Висновки

Запропоновано архітектуру мобільного додатку на базі React Native для формування оптимізованих маршрутів до об'єктів інтересу (POI) та фонової навігаційної підтримки користувача з використанням штучного інтелекту. Система поєднує голосові та текстові інтерфейси, геоінформаційні сервіси (Google Maps API / OpenStreetMap), генерацію описів через AI (ChatGPT або Gemini), та локальну озвучку за допомогою gTTS. Мобільний додаток виконує ключову логіку взаємодії, а централізована база даних PostgreSQL на сервері забезпечує збереження описів POI. Архітектура дозволяє формувати інтелектуальні туристичні або освітні маршрути, а також озвучувати інформацію про об’єкти поблизу у фоновому режимі без необхідності постійної взаємодії з екраном.

Використані джерела

[1] izi.TRAVEL. “AI Itinerary and global audio tour catalogue,” 2024. Available: https://izi.travel.

[2] VoiceMap. “GPS-audio tours with Mapmaker synchronization,” 2024. Available: https://voicemap.me.

[3] GuideAlong. “Scenic road-trip audio guide platform,” 2024. Available: https://guidealong.com.

[4] GPSmyCity. “Self-guided walking tours for 1 000+ cities,” 2024. Available: https://www.gpsmycity.com.

[5] izi.Travel Ukraine. “Аудіогіди українськими містами,” 2024. Available: https://izi.travel/uk.

[6] My Rivne. “Цифровий туристичний гід міста Рівне,” 2024. Available: https://myrivne.app (проєкт Rivne Smart Tourism).

[7] Ukraine Audio Guide. “Аудіоекскурсії українськими містами,” 2024. Available: https://audio.guide/ua.

[8] M. Mathias, A. Moussa, and F. Zhou, “Optimisation using Natural Language Processing: Personalized Tour Recommendation for Museums,” *Proc. Int. Conf. Smart Cities*, 2015.

A. Bracco, M. Carvalho, and L. Parodi, “Museum Accessibility Through Wi-Fi Indoor Positioning,” *Sensors*, vol. 20, no. 8, pp. 1–15, 2020.

Марковські та байєсівські моделі у вебаналітиці поведінки користувачів

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.060

Мороз Дмитро
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
dmytro.a.moroz@lpnu.ua

***Анотація* — У статті розглянуто застосування статистичних методів для аналізу поведінкових патернів користувачів вебплатформ. Проведено порівняльний аналіз моделей марковських ланцюгів та байєсівських підходів, які використовуються для виявлення закономірностей переходів між станами користувацької взаємодії. На прикладі даних OTT-платформи Netflix продемонстровано можливості кожного методу для прогнозування дій користувачів. Встановлено, що моделі марковських ланцюгів ефективні для відтворення послідовності переходів і побудови карти навігації, тоді як байєсівський підхід дозволяє визначати ймовірності цільових дій і працювати з неповними або нерівномірними даними. Результати дослідження свідчать про доцільність розроблення гібридних моделей, що поєднують часову логіку марковських процесів і гнучкість байєсівських оцінок, для підвищення точності прогнозування поведінки користувачів вебплатформ.**

Ключові слова — вебаналітика, поведінка користувачів, марковський ланцюг, байєсівський метод, OTT-платформи

I. Вступ

У сучасних умовах цифровізації суспільства вебаналітика стає ключовим інструментом для дослідження поведінки користувачів, оптимізації онлайн-платформ і підвищення ефективності електронних сервісів. Аналіз дій користувачів дозволяє виявляти закономірності навігації, прогнозувати наступні кроки та формувати персоналізовані рекомендації. Для цього дедалі частіше застосовуються статистичні та ймовірнісні моделі, здатні описувати послідовність і контекст користувацької взаємодії.

Серед таких підходів особливу увагу привертають марковські ланцюги та байєсівські методи, які забезпечують різні аспекти моделювання поведінкових процесів: часову динаміку та оцінку умовних ймовірностей. Їхнє порівняння дозволяє визначити найбільш ефективні інструменти для аналізу користувацьких патернів і підвищення точності прогнозування у сфері вебаналітики.

II. Виклад основного матеріалу

Мета роботи: Метою роботи є порівняння ефективності марковських і байєсівських моделей у задачах аналізу та прогнозування поведінкових патернів користувачів вебплатформ, визначення їхніх переваг, обмежень і практичних напрямів застосування для оптимізації користувацької взаємодії.

Для досягнення поставленої мети було використано комплексний статистичний підхід, що включає побудову та порівняння марковських ланцюгів і байєсівських ймовірнісних моделей.

Дослідження здійснювалося на основі відкритого набору даних, що містить детальну інформацію про взаємодію користувачів із сервісом Netflix (https://www.kaggle.com/datasets/arjunajn/netflix-watch-log). Цей набір даних є репрезентативним джерелом для досліджень у галузі вебаналітики, поведінкового моделювання та побудови систем персоналізованих рекомендацій.

З вихідного датасету було сформовано набір послідовностей подій для кожного користувача. Кожна подія відображала певний стан взаємодії — наприклад, вибір контенту (*browseTitles*), перегляд деталей (*movieDetails*), початок відтворення (*playback*) тощо.

У результаті попереднього аналізу ідентифіковано 32 унікальні стани навігації, які охоплюють повний життєвий цикл взаємодії користувача з платформою. Отримані послідовності слугували основою для побудови моделей переходів між станами.

На першому етапі проведено аналіз поведінкових послідовностей за допомогою марковських ланцюгів. Цей метод дозволив описати ймовірність переходу користувача від одного стану до іншого та побудувати матрицю переходів, що відображає структуру навігаційних дій (Рис. 1).

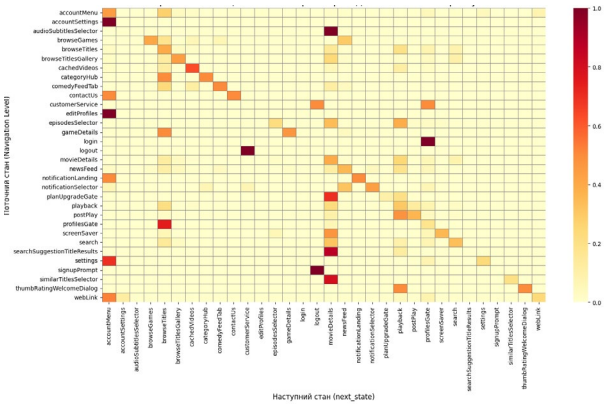


Рисунок 1. Переходи користувачів

На основі отриманих результатів візуалізовано типові шляхи користувачів, зокрема цикл *browseTitles → movieDetails → playback → postPlay → browseTitles*, який є характерним для платформ потокового відео.

Цей цикл відображає природну логіку користування сервісом — від вибору контенту до його перегляду і повернення до пошуку нового відео.

На другому етапі було застосовано байєсівський підхід, який дозволяє уточнювати ймовірнісні оцінки переходів у процесі надходження нових даних і враховувати невизначеність у спостереженнях. Для кожного стану було обчислено ймовірність переходу до ключової дії — перегляду відео (playback). Отримані результати подано у вигляді теплової карти (рис. 2), що ілюструє, з яких станів користувач найчастіше переходить до перегляду.

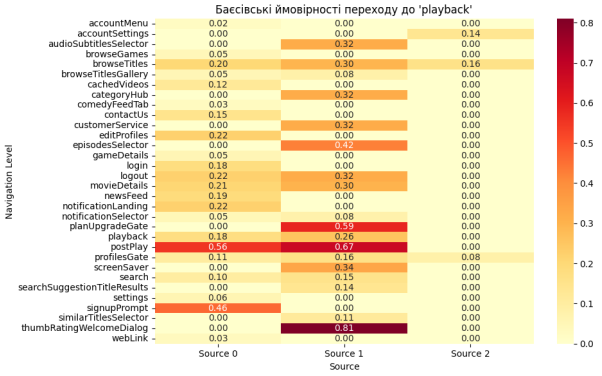


Рисунок 2. Байєсівські ймовірності переходу користувачів до стану перегляду (playback)

Найвищі ймовірності виявлено для станів *thumbRatingWelcomeDialog* (0,81), *postPlay* (0,65) та *planUpgradeGate* (0,59), що вказує на сильну кореляцію між оцінкою контенту, завершенням попереднього перегляду і запуском нового відео.

Обидва розглянутих методи мають свої переваги та недоліки, які обумовлені їх певною обмеженістю. Загалом, вони обидва відтворили реальну картину взаємодії користувача з сайтом.

Метод марковських ланцюгів показав, як користувачі переходять між екранами Netflix, тобто дозволяє побудувати карту взаємодій. У випадку даного датасету переходи виглядають високоструктурованими, що свідчить про типовість користувацьких сценаріїв (наприклад, *profilesGate → browseTitles → movieDetails → playback*).

Байєсівський підхід оцінює ймовірність того, що користувач розпочне перегляд (playback), залежно від поточного стану; це дає можливість оцінити ефективність кожного етапу навігації щодо стимулювання переглядів.

Порівняльний аналіз двох підходів наведений в таблиці 1.

ТАБЛИЦЯ 1. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАРКОВСЬКИХ ЛАНЦЮГІВ ТА БАЙЄСІВСЬКОГО ПІДХОДУ

Критерій	***Марковський ланцюг***	***Байєсівський підхід***
Тип моделі	Послідовна, стохастична.	Імовірнісна, класифікаційна.
Що показує	Як користувач рухається між станами навігації (перехід між сторінками, меню, переглядами).	Яка ймовірність того, що користувач почне перегляд (playback) з певного стану або контексту.
Основна мета	Моделювання ланцюжків переходів.	Моделювання умовної ймовірності події.
Переваги	Враховує часову послідовність дій. Добре показує "шляхи користувача". Підходить для побудови графів переходів.	Гнучкий до додаткових ознак (пристрій, країна, тип користувача). Дає інтерпретовані ймовірності. Може працювати навіть із неповними даними.
Недоліки	Ігнорує фактори контексту (час, пристрій, профіль). Якщо даних мало – переходи виглядають детермінованими (1.0).	Не враховує часову послідовність (стани незалежні). Припущення незалежності ознак може спотворювати результати.
В аналізованому датасеті Netflix	Модель виявила сталі, послідовні переходи: profilesGate → browseTitles, searchSuggestionTitleResults → movieDetails. Поведінка структурована.	Модель показала ймовірність початку перегляду, найвищу після thumbRatingWelcomeDialog, postPlay, episodesSelector.
Приклад результату	profilesGate → browseTitles (ймовірність ≈ 0.75).	thumbRatingWelcomeDialog → playback (ймовірність ≈ 0.81).
Тип інформації, що дає модель	Структура шляху користувача, навігаційна поведінка.	Ймовірність конверсії до перегляду з різних точок взаємодії.
Ефективність методу	Добре підходить для аналізу сценаріїв використання (UX, flow користувача).	Корисний для оцінки готовності користувача до перегляду (модель конверсії).

III. Висновки

Проведене дослідження підтвердило, що обидва методи ефективні у виявленні поведінкових закономірностей, проте мають різну аналітичну спрямованість. Марковські моделі є доцільними для аналізу послідовності дій і побудови структурних моделей навігації. Байєсівські підходи краще відображають контекстуальні фактори та ймовірність конверсійних подій.

Перспективним напрямом подальших досліджень є створення гібридних моделей, що поєднують часову логіку марковських процесів і гнучкість байєсівських оцінок, що дозволить підвищити точність прогнозування поведінки користувачів і ефективність вебаналітичних систем.

Список літератури

[1] Naprawski, T. (2023). The impact of web analytics tools on knowledge management. *Procedia Computer Science, 225*, 3404–3414. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.123

[2] Bekavac, I., & Garbin Praničević, D. (2015). Web analytics tools and web metrics tools: An overview and comparative analysis. *Croatian Operational Research Review, 6*(2), 373–386. https://doi.org/10.17535/crorr.2015.0029

[3] Hausmann, V., Williams, S. P., & Schubert, P. (2012). Developing a framework for web analytics. In *BLED 2012 Proceedings* (Paper 11). https://aisel.aisnet.org/bled2012/11

[4] Önder, I., & Berbekova, A. (2022). Web analytics: More than website performance evaluation? *International Journal of Tourism Cities, 8*(3), 603–615. https://doi.org/10.1108/IJTC-10-2021-0213

[5] Kalan, R. (2025). Website analysis in qualitative research. *International Journal of Advanced Research, 13*(2), 536–544. https://doi.org/10.21474/IJAR01/000000

[6] Qing, H., Ibrahim, R., & Nies, H. W. (2024). Analysis of web design visual element attention based on user educational background. *Scientific Reports, 14*, 4657. https://doi.org/10.1038/s41598-024-54444-8

[7] Morales-Vargas, A., Pedraza-Jimenez, R., & Codina, L. (2023). Website quality evaluation: A model for developing comprehensive assessment instruments based on key quality factors. *Journal of Documentation, 79*(7), 95–114. https://doi.org/10.1108/JD-11-2022-0246

СЕКЦІЯ 6

МАТЕМАТИЧНЕ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

MCIT Modeling, control & information technologies

Numerical Optimization of a Pseudoparabolic Systems with Memory

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.061

Andrii Anikushyn
Faculty of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
andrii.anikushyn@knu.ua

Viktoria Nazarchuk
Faculty of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
nazarchukviktoriia@knu.ua

Abstract—**We employ the method of *a priori* inequalities in negative norms to prove the existence of a pointwise optimal control for the regularized problem corresponding to a time-nonlocal pseudoparabolic integro-differential equation with a Volterra-type integral term. Certain differential properties of the cost functional are investigated, and a numerical example illustrating the computation of the optimal control is presented.**

Keywords— Dirichlet problem; integro-differential equation; pseudoparabolic equation, Volterra operator, a priori estimates, generalized solutions, optimal control

I. Introduction

Within applied mathematics, considerable interest is directed toward pseudoparabolic differential and integro-differential formulations. Equations of this character serve as analytical frameworks for a broad spectrum of physical phenomena, encompassing delayed radiation transport, two-phase flow in porous structures influenced by dynamic capillarity or hysteretic behavior, ionic diffusion within soils, and thermal propagation through heterogeneous composites (see, for instance, [1], [2], and sources cited therein).

In [1], [3] S.I. Lyashko and his collaborators developed the method of *a priori* inequalities in negative norms, which enabled the study of a broad class of optimization problems for systems with distributed parameters, including differential models of the pseudoparabolic type (see also [4] and the references therein). It was later established that this methodology is also well suited for addressing Dirichlet problems involving integro-differential equations with Volterra-type integral terms [2], [5], [6].

We consider the linear pseudoparabolic differential equation $\mathcal{L}u \equiv \mathcal{L}_1 u + \mathcal{L}_2 u = f$, where

$$\mathcal{L}_1 u \equiv -\sum_{i,j=1}^{n} \left(a_{ij}(x)\, u_{x_j}\right)_{x_i t} + a(x)u_t - \\ -\sum_{i,j=1}^{n} \left(b_{ij}(x)\, u_{x_j}\right)_{x_i} + \sum_{i=1}^{n} b_i\,(x)u_{x_i} + b(x)u, \quad (1)$$

and

$$\mathcal{L}_2 u \equiv \int_0^t \sum_{i=1}^{n} \left(K_{ij}(x,t,\tau)\, u_{x_i}(x,\tau)\right)_{x_i} + \\ \sum_{i=1}^{n} K_i\,(x,t,\tau)u_{x_i} + K(x,t,\tau)u\, d\tau, \quad (2)$$

with initial-boundary Dirichlet conditions

$$u|_{t=0} = 0,\ u|_{x\in\partial\Omega} = 0. \quad (3)$$

In [6], we stated a priori inequalities similar to those in [1] and [2] for the case $b_i = K_i = K = 0$. The results concerning the well-posedness of the initial-boundary problems and the existence of optimal control was justified in the cited work.

II. Main Spaces

The evolution of the system is described by the linear equation $\mathcal{L}u = f$ in the domain $Q = \Omega \times (0,T)$. We assume some smoothness assumptions on the coefficients and the kernels as in [6].

By W_{BR}, H_{BR} we denote the completion of the space of smooth functions C^{∞}_{BR} that satisfy the conditions (3) with respect to the norms

$$\| u \|_{W_{BR}} = \left(\int_Q u_t^2 + \sum_{i=1}^{n} u_{x_i t}^2\, dQ\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$\| u \|_{H_{BR}} = \left(\int_Q u^2 + \sum_{i=1}^{n} u_{x_i}^2\, dQ\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Similarly, we define W_{BR^+}, H_{BR^+}. Finally, by W^-_{BR}, H^-_{BR} , $W^-_{BR^+}$, $H^-_{BR^+}$ we denote the negative spaces constructed from the corresponding positive spaces with respect to $L_2(Q)$.

Paper [6] provides theorems on well-posedness and existence on optimal control. In particular

Definition. *A function $u \in H_{BR}$ is called a generalized (weak) solution of the equation $\mathcal{L}u = f$, $f \in W^-_{BR^+}$ if*

$$\langle u, \mathcal{L}^* v\rangle_{H_{BR}} = \langle f, v\rangle_{W_{BR^+}},$$

for any functions $v \in W_{BR^+}$ such that $\mathcal{L}^* v \in H^-_{BR}$.

Theorem 1. *For any $f \in W_{BR^+}^-$ there exists a unique solution $u \in H_{BR}$ of the equation $\mathcal{L}u = f$ in the sense of definition above, and there exists a constant $C > 0$ such that $\| u \|_{H_{BR}} \leq C \| f \|_{W_{BR^+}^-}$.*

III. Control Regularization

We average the right-hand side $F = f + Ah$ in optimal control problem from [6] and consider the regularized pointwise control problem:

$$\mathcal{L}u_\varepsilon = f_\varepsilon + \mathcal{A}_\varepsilon h, u_\varepsilon \in W_{\mathrm{BR}}, \quad (6)$$

$$J_\varepsilon(h) = ||u_\varepsilon - u(h)||^2 . \quad (7)$$

Here,

$$f_\varepsilon(x,t) = \int \omega_\varepsilon(y) f(x_1 - y, x_2, .., x_\mathrm{n}, t) dy, \quad (8)$$

$$\mathcal{A}_\varepsilon h(x,t) = \sum_{k=1}^{s} a_\varepsilon\left(x_1 - x_{1,\mathrm{k}}\right)\varphi_\mathrm{k}(x_2, .., x_\mathrm{n}, t) . \quad (9)$$

with appropriate convolutional kernels ω_ε and $a_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} 1_{[-\frac{\varepsilon}{2}, \frac{\varepsilon}{2}]}$.

It can be shown that, if the set of admissible controls $\mathcal{U}$ is closed, convex, and bounded in the Hilbert space $\mathcal{H}$, then the optimal control problem (6)-(9) has solution, which converges weakly to the solution of the initial optimal control problem in the space $\mathcal{H}$, when $\varepsilon \to 0$

Theorem 2. *For the problem (6)-(9), the functional $J_\varepsilon(h)$ is Fréchet differentiable for $h \in \mathcal{U}$, and its Fréchet derivative has the form:*

$$J_h(\Delta h) = \frac{1}{\varepsilon}\int_{Q'} \sum_{i=1}^{s} (Rv)\, \varphi_i(x', t) dQ' \cdot \Delta x_{1,i} +$$

$$+ \frac{1}{\varepsilon}\int_{Q'} \sum_{i=1}^{s} \int_{x_{1,i}-\varepsilon/2}^{x_{1,i}+\varepsilon/2} v(\xi, x', t) d\xi \cdot \Delta\varphi_i(x', t) dQ',$$

where

$$Rv = v\left(x_{1,i} + \frac{\varepsilon}{2}, x', t\right) - v\left(x_{1,i} - \frac{\varepsilon}{2}, x', t\right),$$

and v is the solution of the adjoint problem

$$\mathcal{L}^* v(h) = 2(u(h) - z_0).$$

IV. Numerical example

Let us consider $\Omega = [-1,1]$, $K_{11} = 1, K_1 = K = 0$, $a_1(x) = 1$, $b(x) = -1$, $b_1(x) = 0$, $b_{11}(x) = -1$, $T = 1$.

Thus, the regularized problem under consideration is of the form:

$$u_t - u_{txx} - u + u_{xx} + \int_0^t u_{xx}(x, \tau) d\tau = a_\varepsilon(x - x_1)\varphi(t).$$

Here, $x \in \Omega = [-1,1], t \in [0,1]$, and (x_1, φ) is the control that belongs to a bounded set of admissible controls $\mathcal{U}$ from the control space $\mathcal{H} = [-1,1] \times L_2(0,1)$. $\mathcal{U}$ is assumed to be sufficiently large. To find the optimal control, we will use the gradient method: $h_{i+1} = h_i - \mu_i \cdot \mathrm{grad} J_{h_i}$. For the initial approximation, we use $x_1 = 0, \varphi(t) = 0$. At each step of the gradient method, the gradient of the quality functional $\mathrm{grad} J_{h_i}$ is computed using the previously computed Fréchet derivative. To compute this gradient, the forward and adjoint problems must be solved

$$\mathcal{L}u(h_i) = \mathcal{A}_\varepsilon h_i, \mathcal{L}^* v(h) = 2(u(h) - z_0).$$

The solutions to the latest problems are obtained using implicit finite-difference schemes.

TABLE I. Table of Values of The Control and The Cost Functional for Different Numbers of Iterations.

Iteration	x_1	J	Iteration	x_1	J
0	0	1.2157	5200	0.4728	0.0231
200	0.2613	0.5954	5400	0.4633	0.0217
400	0.3020	0.3962	5600	0.4692	0.0205
600	0.3324	0.2928	5800	0.4756	0.0193
800	0.3595	0.2296	6000	0.4687	0.0185
1000	0.3709	0.1869	6200	0.4751	0.0173
1200	0.3865	0.1562	6400	0.4711	0.0165
1400	0.3951	0.1331	6600	0.4794	0.0157
1500	0.4030	0.1234	6800	0.4727	0.0150
1600	0.4032	0.1149	7000	0.4716	0.0143
1800	0.4156	0.1004	7200	0.4815	0.0138
2000	0.4213	0.0886	7400	0.4746	0.0132
2200	0.4282	0.0788	7600	0.4744	0.0127
2400	0.4303	0.0705	7800	0.4847	0.0121
2600	0.4356	0.0635	8000	0.4792	0.0117
2800	0.4397	0.0576	8200	0.4787	0.0113
3000	0.4406	0.0522	8400	0.4841	0.0108
3200	0.4406	0.0477	8600	0.4895	0.0104
3400	0.4525	0.0438	8800	0.4833	0.0100
3600	0.4541	0.0402	9000	0.4845	0.0097
3800	0.4547	0.0371	9200	0.4883	0.0093
4000	0.4599	0.0344	9400	0.4892	0.0090
4200	0.4549	0.0320	9600	0.4855	0.0088
4400	0.4571	0.0299	9800	0.4906	0.0088
4600	0.4687	0.0278	10000	0.4836	0.0083
4800	0.4608	0.0260	10100	0.4863	0.0081
5000	0.4669	0.0244			

In the graphs below, we will display the results of the numerical approximation $u(h)$ and $\varphi(t)$ after $n = 400, 1500, 4000, 10000$ iterations and plots the change of the cost functional $J(h)$ as well as the graph of the change in the control with respect to the control variable x_1 .

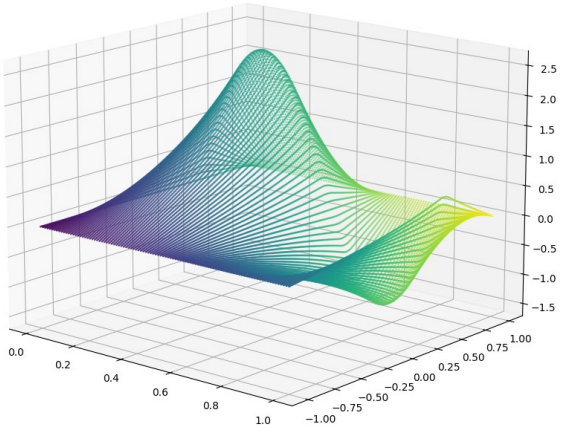


Figure 1: Desired state function z_0 .

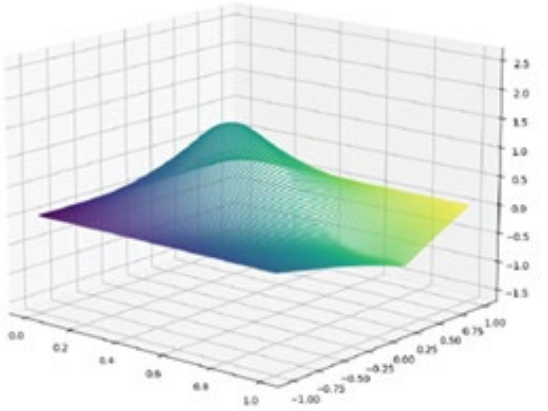


Figure 2: Numerical approximations $u(h)$ after 400 iterations.

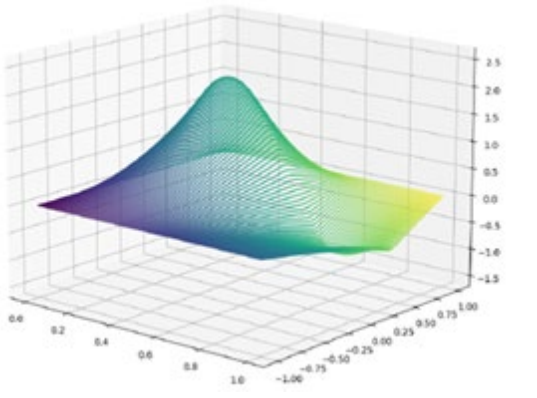


Figure 3: Numerical approximations $u(h)$ after 1500 iterations.

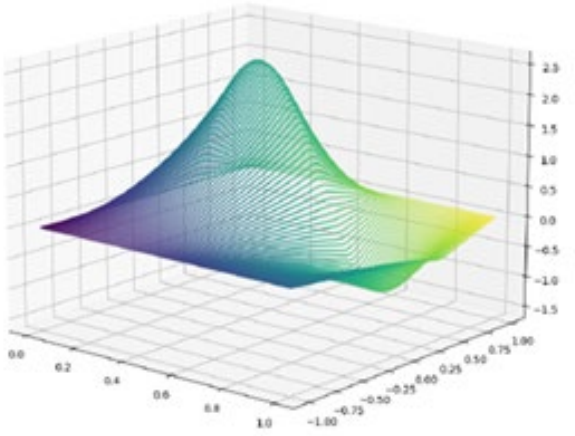


Figure 4: Numerical approximations $u(h)$ after 4000 iterations.

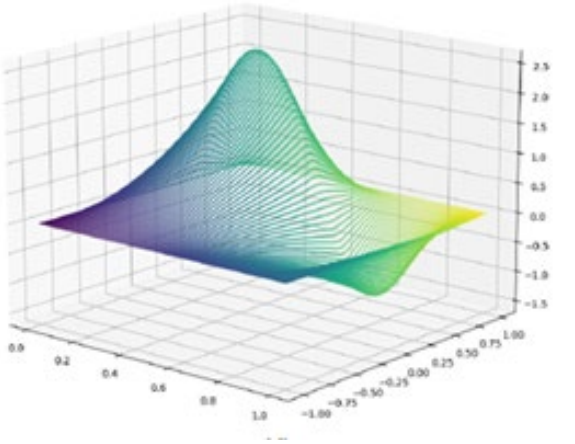


Figure 5: Numerical approximations $u(h)$ after 10000 iterations.

V. Conclusions

In this paper, we examine the problem of determining an optimal pointwise control for systems governed by pseudoparabolic equations, integro-differential in nature. The study is grounded in the method of *a priori* estimates in negative norms. By establishing such inequalities within an appropriate system of functional spaces, we claim the existence of an optimal control for both the original and the regularized formulations. Unlike many related studies, our approach does not rely on the nonnegative definiteness of the associated differential operator, thereby expanding the scope of its applicability.

The derived Fréchet derivative of the cost functional for the regularized problem enables the use of gradient-based numerical schemes to compute the optimal control. A representative example demonstrates the effectiveness of this method: by employing a regularized point control, we achieve close agreement between the computed and desired trajectories, as confirmed by the diminishing value of the cost functional. Additional numerical results and visualizations highlight the convergence behavior,

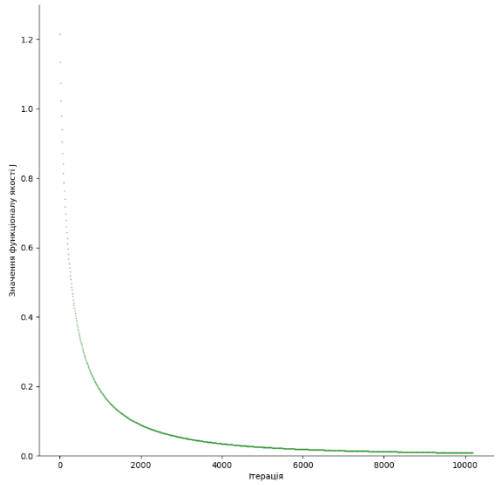


Figure 6: The graph of the change in the costcriterion.

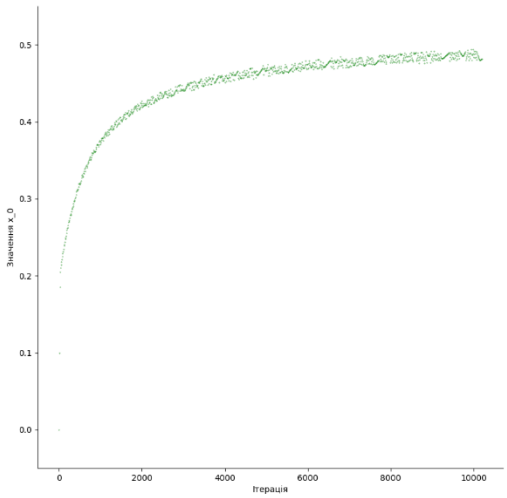


Figure 7: The graph of the change in the control.

including a non-monotonic trend in one component of the control, likely due to the gradient step size. Although reducing the step could improve smoothness, it would significantly increase computational effort.

It is important to note that the cost functional is generally non-convex, and thus the resulting control may represent either a local or a global minimum. This issue deserves further exploration in specific contexts. Nevertheless, in the presented example, convergence of the cost functional to zero confirms the attainment of an optimal control.

A natural continuation of this work involves the study of controllability and asymptotic controllability problems for the corresponding systems, which may further extend the theoretical and practical implications of the proposed framework.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to the Armed Forces of Ukraine. Without their heroic contributions, we would not be able to conduct this or any other research.

REFERENCES

[1] Lyashko S.I. "Generalized Optimal Control of Linear Systems with Distributed Parameters", Kluwer Academic Publishers, 2002, 455 p.

[2] Anikushyn A.V., Andaral A.I. "Generalized optimal control of pseudo-parabolic integro-differential systems", Nonlinear Oscillations, 2024, Vol.27, № 1, pp. 3-18. (in Ukrainian)

[3] Klyushin D.A., Lyashko S.I., Nomirovskii D.A., Petunin Yu.I., Semenov V.V. "Generalized solutions of operator equations and extreme elements", Springer Science+Business Media, 2011, 202p.

[4] Lyashko S.I. "Certain questions of impulse-point control of pseudoparabolic systems", Ukrainian Mathematical Journal, 1985, № 37, pp. 292-295.

[5] Anikushyn A., Hulianytskyi A. "Generalized solvability of parabolic integro-differential equations", Differential Equations, 2014, Vol.50, № 1, pp. 98-109.

[6] Anikushyn A., Nazarchuk V. “Point Optimal Control of Pseudoparabolic Systems with Memory”, Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, 2025, № 7, pp. 221–222.

MCIT Modeling, control & information technologies

Integral Conjugation Condition for Smart Geobarriers with Assimilation of Sensor Data

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.062

Olena Belozerova
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
ol.d.kozhushko@nuwm.edu.ua

Petro Martyniuk
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
p.m.martyniuk@nuwm.edu.ua

Abstract— **The long-term integrity of geoenvironmental containment systems is critical for preventing groundwater contamination, while conventional monitoring is only reactive. This work addresses the need for proactive, predictive monitoring by deriving a novel integral conjugation boundary condition for a smart geobarrier. This condition incorporates real-time sensor data through a Newtonian nudging data assimilation term, providing a mathematically rigorous mechanism to continuously steer a physical model toward observed reality. As an example of application, a boundary value problem for the process of filtrational consolidation is formulated.**

Keywords—mathematical modeling, filtrational consolidation, conjugation condition, smart geobarrier, data assimilation.

I. Introduction

The management of waste from municipal, industrial, and mining activities presents a significant environmental engineering challenge. Critical infrastructure like landfills and wastewater lagoons pose a substantial threat to groundwater resources. The primary defense is the geoenvironmental containment system, traditionally relying on passive barriers like compacted clay liners and high-density polyethylene (HDPE) geomembranes.

However, the long-term integrity of these passive systems is uncertain, as they are susceptible to degradation and defects [1]. Conventional monitoring is reactive, confirming failures only after contamination has occurred, at which point remediation is costly and often ineffective. In the long term, this approach cannot provide safe and sustainable solution.

The recently introduced "smart" or "intelligent" geobarriers have embedded sensing capabilities, allowing for continuous, real-time monitoring. They perform their traditional functions of separation, filtration, drainage, reinforcement, and containment, while simultaneously acting as integrated sensor networks. This dual functionality enables them to transmit critical information about the system's physical state, such as strain, stress, and temperature. This approach avoids the need for discrete, intrusive instrumentation [2].

Sensing capability of smart geobarriers is often achieved by embedding electrically conductive materials, that would change properties drastically if any leak in the geobarrier occurs. More advanced technology, called fiber-optic sensing, uses Fiber Bragg Gratings (FBG) – periodic variations in the refractive index of an optical fiber. Such optical sensors reflect light at a specific wavelength, which is highly sensitive to mechanical strain and temperature. A key advantage is multiplexing, where hundreds of FBG sensors can be placed along a single fiber for quasi-distributed sensing [3]. The fiber-optics sensors can be applied to detect strain, water pressure and even concentration of chemicals [4].

Moreover, the presence of multiple sensors allows for more precise monitoring and application of this data to predictive modeling. Together with adequate mathematical models and data assimilation techniques, they provide a framework to merge real-time sensor data with model predictions, creating a dynamically updated understanding of the system's state.

However, accurate model representation of this geobarriers is critical for further implementation of such intelligent systems. As a kind of thin inclusion, smart geobarrier would require complex conjugation conditions for modeling, similar to the conditions proposed in [5, 6]. Further incorporation of data assimilation term into this conjugation conditions would ensure the accurate and practical implementation of sensor data in the mathematical model.

II. Newtonian Nudging Assimilation

Data Assimilation (DA) is a set of mathematical techniques designed to produce an optimal estimate of the state of a dynamic system by combining information from a numerical model and observations. The numerical model provides a physically consistent description of the system, but it is imperfect due to errors in its initial conditions, parameters, and physical approximations. Observations from sensors provide direct information about the real state of the system, but they are typically sparse, indirect, and contain measurement errors. The purpose of DA is to merge these two incomplete and uncertain sources of information, decreasing uncertainty and improving the model's forecasting capability [7].

The use of data assimilation is especially advantageous for refining the conjugation conditions for geobarriers. It would allow to update the model with accurate sensor information, while sustaining the continuity of model variable fields and accounting for possible measurement flaws.

The method we chose for this problem, called Newtonian nudging or Newtonian relaxation, is a continuous data assimilation method that gently steers, or "nudges," a model's simulation toward observations as it runs. Instead of solving a large-scale optimization problem like variational methods, nudging adds a non-physical relaxation term directly into the model's prognostic equations [8]. In general terms, its implementation can be described with the following equation:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F(u, X, t) + G \cdot W(X, t) \cdot (u_{obs} - u), \qquad (1)$$

where $F(u, X, t)$ represents the original model physics; $(u_{obs} - u)$ is the innovation, or the difference between the observation and the model's current state; G is the nudging coefficient, which determines the strength of the correction and represents a relaxation time scale; and $W(X, t)$ represents weighting functions that localize the nudging's influence in space and time [9].

At each time step, the nudging term applies a correction proportional to the difference between the model state and the observations, continuously pushing the simulation closer to reality. This approach is computationally much simpler than variational methods, as it does not require the development of a complex adjoint model.

III. Integral conjugation condition with data assimilation term

For derivation of this condition, we consider a low-permeability geobarrier ω of small thickness d, installed in the soil medium. The geobarrier has sensing capabilities that allow to observe strain, which can be used to estimate soil water pressure head h_{obs}. The water transfer inside the geobarrier can be described with the equation of elastic filtration. With addition of the Newtonian nudging term, the governing equation is as follows:

$$\beta_\omega(t)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi}\left(k_\omega(t)\frac{\partial h}{\partial \xi}\right) - GW(\xi, t)(h_{obs} - h), 0 < \xi < d, t > 0, \qquad (2)$$

$$h(0, t) = h^-(t), h(d, t) = h^+(t), t > 0. \qquad (3)$$

Here, h is pressure head, h^+ and h^- are pressure head values on the boundaries of the inclusion, $k_\omega(t)$ is the barrier hydraulic conductivity, $\beta_\omega(t) = \gamma a_\omega/(1 + e_\omega)$, where γ is specific weight of the pore water, a_ω is compressivity of the porous geobarrier material, $e_\omega = n_\omega/(1 - n_\omega)$ is porosity coefficient, n_ω is porosity of the geobarrier. For simplicity, we consider a one-dimensional problem here, but the same can be applied to the higher-dimensional cases.

Integrating the equation (2), we get

$$k_\omega(t)\frac{\partial h}{\partial \xi} = \beta_\omega(t)\int_0^\xi \frac{\partial h}{\partial t}dz - \int_0^\xi GW(z, t)(h_{obs} - h)dz + h_1,$$

where h_1 is a unknown function that may depend on time t. Than

$$h(\xi, t) = \frac{\beta_\omega(t)}{k_\omega(t)}\int_0^\xi\int_0^\varsigma \frac{\partial h}{\partial t}dzd\varsigma - \frac{1}{k_\omega(t)}\int_0^\xi\int_0^\varsigma GW(z, t)(h_{obs} - h)\,dzd\varsigma + \frac{\xi}{k_\omega(t)}h_1(t) + h_2(t), \qquad (4)$$

where h_2 is also an unknown function that only depends on time. Further, from (4) and boundary conditions (3) we have

$$h(0, t) = h_2 = h^-,$$
$$h(d, t) = \frac{\beta_\omega(t)}{k_\omega(t)}\int_0^d\int_0^\varsigma \frac{\partial h(z, t)}{\partial t}dzd\varsigma - \frac{1}{k_\omega(t)}\int_0^\xi\int_0^\varsigma GW(h_{obs} - h)\,dzd\varsigma + \frac{d}{k_\omega(t)}h_1(t) + h_2(t) = h^+. \qquad (5)$$

For the system of equations (5), we have

$$h_1 = \frac{k_\omega(t)}{d}\left[h^+ - h^- - \frac{\beta_\omega(t)}{k_\omega(t)}\int_0^d\int_0^\varsigma \frac{\partial h(z, t)}{\partial t}dzd\varsigma + \frac{1}{k_\omega(t)}\int_0^d\int_0^\varsigma GW(h_{obs} - h)\,dzd\varsigma\right].$$

The difference $(h^+ - h^-)$, further denoted $[h]$, is the pressure head jump that occurs when the water is passing through the inclusion.

Applying this to the the problem (1), (2) we have

$$h(\xi, t) = h^- + \frac{\beta_\omega(t)}{k_\omega(t)}\int_0^\xi\int_0^\varsigma \frac{\partial h}{\partial t}dzd\varsigma - \frac{1}{k_\omega(t)}\int_0^\xi\int_0^\varsigma GW(\varsigma, t)(h_{obs} - h)\,dzd\varsigma + \frac{\xi}{k_\omega(t)}h_1.$$

For the final derivation of the conjugation condition, we need to use the soil flux rate u. According to Darcy's law, we have

$$u = -k_\omega(t)\frac{\partial h}{\partial \xi} = -\beta_\omega(t)\int_0^\xi \frac{\partial h}{\partial t}dz + \int_0^\xi GW(h_{obs} - h)dz - h_1. \qquad (6)$$

Thus, we get the following conjugation condition for non-ideal contact with a nudging term:

$$u^- = u|_{\xi=0} = -\frac{k_\omega(t)}{d}\left([h] - \frac{\beta_\omega(t)}{k_\omega(t)} \times \times \int_0^d\int_0^\varsigma \frac{\partial h(z, t)}{\partial t}dzd\varsigma + \right. \qquad (7)$$

$$+\frac{1}{k_\omega(t)}\int_0^d\int_0^\varsigma GW(h_{obs}-h)\,dzd\varsigma\Big);$$

$$u^+ = u|_{\xi=d} = -\beta_\omega(t)\int_0^d \frac{\partial h}{\partial t}dz +$$

$$+\int_0^d GW(z,t)(h_{obs}-h)dz -$$

$$-\frac{k_\omega(t)}{d}\Big([h]-\frac{\beta_\omega(t)}{k_\omega(t)}\int_0^d\int_0^\varsigma \frac{\partial h(z,t)}{\partial t}dzd\varsigma +$$

$$+\frac{1}{k_\omega(t)}\int_0^d\int_0^\varsigma GW(h_{obs}-h)\,dzd\varsigma\Big). \quad (8)$$

IV. Application to a boundary value problem

The conjugation conditions (7), (8) can be used in the mathematical model to simulate the processes in the soil with smart geobarrier installed. For example, consider a soil layer of thickness l with a geobarrier ω of thickness d, $d \ll l$, located on depth $x = \xi$, where material of the thin inclusion ω has characteristics different from that of the soil medium. Applying the filtrational consolidation equation according to [10], we get the following boundary value problem:

$$\frac{\gamma a}{1+e}\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\Big(k(t)\frac{\partial h}{\partial x}\Big), x \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t > 0, \quad (9)$$

$$h(x,t)|_{x=0} = 0, u(x,t)|_{x=l} = 0, t > 0, \quad (10)$$

$$h(x,0) = h_0(x), x \in \overline{\Omega_1} \cup \overline{\Omega_2}, \quad (11)$$

$$u^- = u|_{x=\xi-0} = -\frac{k_\omega(t)}{d}\Big([h]-\frac{\beta_\omega(t)}{k_\omega(t)}\times$$

$$\times\int_0^d\int_0^\varsigma \frac{\partial h(z,t)}{\partial t}dzd\varsigma + \quad (12)$$

$$+\frac{1}{k_\omega(t)}\int_0^d\int_0^\varsigma GW(h_{obs}-h)\,dzd\varsigma\Big),$$

$$u^+ = u|_{x=\xi+0} = -\beta_\omega(t)\int_0^d \frac{\partial h}{\partial t}dz +$$

$$+\int_0^d GW(z,t)(h_{obs}-h)dz -$$

$$-\frac{k_\omega(t)}{d}\Big([h]-\frac{\beta_\omega(t)}{k_\omega(t)}\int_0^d\int_0^\varsigma \frac{\partial h(z,t)}{\partial t}dzd\varsigma + \quad (13)$$

$$+\frac{1}{k_\omega(t)}\int_0^d\int_0^\varsigma GW(h_{obs}-h)\,dzd\varsigma\Big).$$

In the formulation above, $\Omega_1 = (0;\xi), \Omega_2 = (\xi;l)$, $0 < \xi < l$, $h_0(x)$ is a set function, γ is specific weight of the pore water, a is soil compressivity coefficient, $e = n/(1-n)$ is soil porosity coefficient, n is soil porosity, k and k_ω are hydraulic conductivities of the soil and the geobarrier, respectively, u is soil flux rate determined according to (6), u^+ and u^- are water flux rates at $x = \xi - 0$ and $x = \xi + 0$, respectively.

V. Conclusion

In this study, we proposed a theoretical framework for integrating real-time sensor data into the mathematical modeling of smart geobarrier systems. The derived integral conjugation boundary condition augmented with a Newtonian nudging term provides a direct and physically consistent method for assimilating observational data, allowing a numerical model to be continuously corrected by measurements. The utility of this condition was demonstrated by formulating a boundary value problem for filtrational consolidation.

Subsequent work should focus on numerical validation through synthetic experiments, conducting a parametric analysis of the nudging coefficient. This foundational research provides an important step toward creating a "digital twin" for smart geobarriers, bridging the gap between advanced sensor technology and predictive mathematical modeling.

VI. References

[1] J. Atmadja and A. Bagtzoglou, Amvrossios, "State of the art report on mathematical methods for groundwater pollution source identification," Environmental Forensics, vol. 2, pp. 205–214, 2001.

[2] M. Abedi, R. Fangueiro, A.G. Correia, and J. Shayanfar, "Smart geosynthetics and prospects for civil infrastructure monitoring: a comprehensive and critical review," Sustainability, vol. 15, no. 12, 9258, 2023.

[3] H. Pei, Y. Zhong, W. Feng, and H. Zhu, "A novel effective stress sensor based on FBG sensing technology for effective stress measurement in soil," Measurement, vol. 243, no. 15, 116331, February 2025.

[4] H. Dong, S. J. Wei, L. Ding, R. Yao, J. Huang, W. Xu et al., "Monitoring chloride ion concentration in saturated cohesive soils by optical fiber technology," Measurement, vol. 253, part B, 117569, 2025.

[5] P. Martyniuk, O. Ulianchuk-Martyniuk, V. Herus, O. Pryshchepa, "Integral conjugation conditions for a discontinuous filtration flow via a geobarrer in the case of its biocolmatation," International Journal of Applied Mathematics, vol. 37, no. 1, pp. 21–28, 2024.

[6] O. Stepanchenko, P. Martyniuk, O. Belozerova, L. Shostak, "Balance boundary conditions for thin boundary layers: derivation from the integral conjugation conditions," International Journal of Applied Mathematics, vol. 36, no. 1, pp. 107–116, 2023.

[7] H. Moradkhani, "Hydrologic remote sensing and land surface data assimilation," Sensors, vol. 8, no. 5, pp. 2986-3004, May 2008.

[8] C. Paniconi, M. Marrocu, M. Putti, and M. Verbunt, "Newtonian nudging for a Richards equation-based distributed hydrological model," Advances in Water Resources, vol. 26, pp. 161–178, 2003.

[9] O.D. Kozhushko, M. V. Boiko, M. Yu. Kovbasa, P. M. Martyniuk, O. M. Stepanchenko, and N. V. Uvarov, "Field scale computer modeling of soil moisture with dynamic nudging assimilation algorithm", Mathematical Modeling and Computing, vol. 9, no. 2, pp. 203–216, 2022.

[10] O. R. Michuta, and P. M. Martyniuk, "Nonlinear Evolutionary Problem Of Filtration Consolidation With The Non-Classical Conjugation Condition," Journal of Optimization Differential Equations and their Applications, vol. 30, no.1, pp. 71–87, 2022.

MCIT Modeling, control & information technologies

Exact signal reconstruction from highly incomplete nonlinear system

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.063

Cherhykalo Denys
Faculty of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine
denischergicalo@gmail.com

Abstract— **L1 regularization has long been used to obtain sparse representations of data, but is it possible to extend the convergence conditions from the linear to the nonlinear case? L1 regularization does not guarantee accurate reconstruction of a sparse state from incomplete data, even under linear constraints. However, once the amount of data exceeds a certain threshold, the probability of reconstruction failure with random matrices will be negligible. Developing a theory to determine the probability of success in the nonlinear case seems useful. This requires defining various classes of random nonlinear functions and examining how their convergence conditions vary. In particular, linear processes are often affected by nonlinear distortions, which are commonly modeled as noise. Identifying the physics and chemical kinetics of these distortions and incorporating them into the model will help improve the probability of successful reconstruction and enable the identification of factors that influence these distortions. This is especially important in biology, where understanding not only the balance of internal processes but also the factors influencing the stability of the system is crucial.**

Keywords — L1 regularization, random matrices, sparse reconstruction, nonlinear inverse problems.

I. Introduction

There are many studies related to L1 regularization for nonlinear cases[9][10][11]. In general, the optimum is determined by the Karush–Kuhn–Tucker conditions. But in this article we will try to describe a basis within which all solutions satisfy nonlinear conditions and within which we will obtain a problem without constraints.

It should also be clarified that there are already problems with some types of nonlinearity that can be reduced to linear ones, which in turn will link the convergence conditions with the linear case[2], although this was done for a specific case.

As in this article, we use singular value decomposition. This decomposition makes it easiest to construct the necessary basis, and this basis is also used in the algorithm itself.

In this article, we also leave room for discussion on how exactly to achieve the optimum in this new basis, there are already articles with practical applications for this[3][4][5][6][7][8].

We will consider those cases when a nonlinear operator can be translated by simple transformations into a nearly linearized form, so that in a given space it looks like this:

$$A(x) = Bx + \varepsilon F(x), B \in R^{n\times m}, m < n,$$

$$x \in U \subset R^n.$$

And also for the given output y there must exist x such that:

$$A(\dot{x}) = y$$

$$|\{i: \dot{x}_i \neq 0\}| = d \ll M$$

We also assume that:

$\|J(F,x)\|_{L_1} \leq 1, x \in U, J(F,x)$ - Jacobian of F.

And the matrix B has independent random coefficients with uniform distribution in the interval $[-\mu, \mu], \mu > 0$.

Without loss of generality, we will assume that only the first d elements are non-zero:

$$\dot{x}_i = 0, i > d$$

Let us consider the singular value decomposition of matrix B:

$$B = U\Sigma V$$

To begin, let's find at least one solution that satisfies our conditions, not necessarily sparse:

$$A(\bar{x}) = B\bar{x} + \varepsilon F(\bar{x}), B \in R^{n\times m}, m < n$$

Let's consider:

$$x = \bar{x} + dx$$

$$A(x) = B(\bar{x} + dx) + \varepsilon F(\bar{x} + dx) = y = B\bar{x} + \varepsilon F(\bar{x})$$

Thus we have:

$$Bdx + \varepsilon\big(F(\bar{x} + dx) - F(\bar{x})\big) = 0$$

Let's replace dx with $V^T b$ and multiply by U^T on the left:

$$U^T U\Sigma V V^T b + \varepsilon U^T\big(F(\bar{x} + V^T b) - F(\bar{x})\big) = 0$$

We reduce unitary matrices and obtain:

$$\Sigma b + \varepsilon U^T\big(F(\bar{x} + V^T b) - F(\bar{x})\big) = 0$$

Using the auxiliary function G we have:

$$G(\alpha) = G_{\bar{x}}(\alpha) = U^T\big(F(\bar{x} + V^T\alpha) - F(\bar{x})\big)$$

$$\Sigma b + \varepsilon G(b) = 0$$

To begin with, let's consider a linear branch, that is, $\varepsilon = 0$:

$$\Sigma b = 0$$

II. Linear Case

Terence Tao and others[1] proved for the linear case that for:

$$d \le m\frac{\alpha(r)}{log(n)}$$

the recovery probability for l1 minimization is:

$$p_{rec} = 1 - O(n^{-r}),$$

where $\alpha(r)$ some function of m close to:

$$\alpha(r) \approx \frac{1}{29.6(r+1)}$$

Similar probability estimates to this article can be obtained by following these steps:

$$rank(\Sigma) = m \text{ thus:}$$
$$b_i = 0, i \le m$$
$$b_i \in R, i > m$$
$$b = I_{n-m}^n c, c \in R^{n-m}$$

Thus, the problem is reduced to the usual non-smooth optimization:

$$F(c) = \|V^T I_{n-m}^n c + \bar{x}\|_{l_1} = \|Kc + \bar{x}\|_{l_1}$$

The optimum point is determined by the presence of a zero vector in the subgradient:

$$0 \in \partial F(c) = S(Kc + \bar{x})K,$$
$$S(x) = \{s: s_i = sign(x_i) if x_i \ne 0, |s_i| \le 1 if x_i = 0\}$$

That is, for $\dot{x}$ to be an optimum, the following conditions must be met:

$$(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d), l_1, \dots, l_{n-d})K^T = 0, \|l\|_\infty \le 1$$
$$(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d), l_1, \dots, l_{n-d}) = r_1 I_n^m V, \|l\|_\infty \le 1, r_1 \in R^m$$
$$(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d), l_1, \dots, l_{n-d}) = r_2 \Sigma V, \|l\|_\infty \le 1, r_2 \in R^m$$
$$(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d), l_1, \dots, l_{n-d}) = rU\Sigma V, \|l\|_\infty \le 1, r \in R^m$$
$$(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d), l_1, \dots, l_{n-d}) = rB, \|l\|_\infty \le 1$$
$$\big(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d)\big) = rB_1, \|rB_2\|_\infty \le 1$$

$$\beta = M[\xi_1^2 + \dots + \xi_n^2] = n\frac{\mu^2}{3}, \xi_i = U([-\mu, \mu])$$

Where $M[\cdot]$ - mathematical expectation for random matrices with a fixed $\dot{x}$.

$$\dot{r} = \beta^{-1}\big(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d)\big)B_1^T$$
$$M[T(B_1)] = M[E - \beta^{-1}B_1^T B_1] = 0$$
$$M[B_1^T B_2] = 0$$
$$M[\dot{r}B_1] = \big(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d)\big)$$
$$M[\dot{r}B_2] = 0$$
$$r = \big(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d)\big)\big(E - T(B_1)\big)^{-1}\beta^{-1}B_1$$

We substitute this $r(B_1, \dot{x})$ and we obtain sufficient stability conditions for $\dot{x}$:

$$r(B_1, \dot{x})B_1 = \big(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d)\big)$$
$$\|r(B_1, \dot{x})B_2\|_\infty < 1$$

To do this, it is sufficient to prove:

$$\|\dot{r}B_2\|_\infty + \|(r(B_1, \dot{x}) - \dot{r})B_2\|_\infty < 1$$

Because of independence of the matrices B_1, B_2 we have $\|\dot{r}B_2\|_\infty$ is close to zero.

Because of $T(B_1)$ is close to zero we have$\|(r(B_1, \dot{x}) - \dot{r})B_2\|_\infty$ is close to zero.

Therefore, although this is a sufficient but not a necessary condition, it describes a large number of cases of convergence

III. Nonlinear Case

For the nonlinear case, we consider:

$$b = (e_1, \dots, e_m, c_1, \dots, c_{n-m}), b = I_m^n e + I_{n-m}^n c$$
$$e \in R^m, c \in R^{n-m}$$

Substituting into the expression we will have:

$$\Sigma(I_m^n e + I_{n-m}^n c) + \varepsilon G(I_m^n e + I_{n-m}^n c) = 0$$
$$\Sigma I_m^n e + \varepsilon G(I_m^n e + I_{n-m}^n c) = 0$$

Solving this equation for e we get $e(c)$:

$$\Sigma I_m^n e(\mathrm{c}) + \varepsilon G(I_m^n e(\mathrm{c}) + I_{n-m}^n c) = 0$$

Let's take the Jacobian of the expression:

$$\Sigma I_m^n J(e, \mathrm{c}) + \varepsilon J\big(G, b(c)\big)(I_m^n J(e, \mathrm{c}) + I_{n-m}^n) = 0$$
$$\big(\Sigma I_m^n + \varepsilon J\big(G, b(c)\big)I_m^n\big)J(e, \mathrm{c}) = -\varepsilon J\big(G, b(c)\big)I_{n-m}^n$$

From which we obtain an expression for the $J(e, \mathrm{c})$:

$$-\varepsilon\big(\Sigma I_m^n + \varepsilon J\big(G, b(c)\big)I_m^n\big)^{-1} J\big(G, b(c)\big)I_{n-m}^n$$

where:

$$b(\mathrm{c}) = I_m^n e(\mathrm{c}) + I_{n-m}^n c$$

Our problem with nonlinear constraints has been reduced to the following:

$$F(c) = \|V^T b(c) + \bar{x}\|_{l_1} \to min$$

The optimum point is determined by the presence of a zero vector in the Clarke subdifferential:

$$0 \in \partial F(c) = S(Kc + \bar{x})V^T J(b, c)$$
$$S(x) = \{s: s_i = sign(x_i) if x_i \ne 0, |s_i| \le 1 if x_i = 0\}$$

To obtain the stability conditions, we introduce the substitution:

$$\dot{B} = Bx + \varepsilon J(F, \dot{x}), \dot{F}(x) = F(x) - J(F, \dot{x})x$$

We have a problem where at $J(\dot{F}, \dot{x}) = 0$:

$$A(x) = \dot{B}x + \varepsilon\dot{F}(x), B \in R^{n \times m}, m < n$$

Then, since:

$$\dot{B} = \dot{U}\dot{\Sigma}\dot{V}, \dot{K} = \dot{V}I_{n-m}^n$$
$$\dot{G}_{\dot{x}}(\alpha) = \dot{U}^T\left(\dot{F}(\dot{x} + \dot{V}^T\alpha) - \dot{F}(\dot{x})\right)$$

For $J(\dot{e}, \dot{\mathrm{c}})$ we have:

$$-\varepsilon\left(\dot{\Sigma}I_m^n + \varepsilon J\left(\dot{G}, \dot{b}(\dot{c})\right)I_m^n\right)^{-1} J\left(\dot{G}, \dot{b}(\dot{c})\right)I_{n-m}^n$$

Therefore, if:

$$(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d), l_1, \dots, l_{n-d})\dot{K} = 0$$
$$\|l\|_\infty < 1$$
$$\dot{K} = \left(E - \varepsilon(\dot{\Sigma}I_m^n)^{-1}\dot{U}^T J(F, \dot{x})\right)K$$

Which doesn't spoil the conditions too much, especially if there is:

$$\big(sign(\dot{x}_1), \dots, sign(\dot{x}_d), \dot{l}_1, \dots, \dot{l}_{n-d}\big)K = 0$$
$$\left\|\dot{l}\right\|_\infty < 1 - C\varepsilon$$

Where the constant C, as can be seen, depends on the distribution of singular values $\dot{\Sigma}I_m$for a given class of random matrices.

IV. Implementation of the algorithm

The author of the article believes that nonlinear reconstruction algorithms, especially in the class described in the introduction, benefit from the transition to the basis that was considered.

We will demonstrate a potential implementation using a simple algorithm:

$$\bar{g}_0 = g_0 \in \partial F(c_0)$$
$$\bar{g}_{k+1} = (1 - \beta)g_k + \beta\bar{g}_k, g_k \in \partial F(c_k)$$
$$\mathrm{c}_{k+1} = c_k - \lambda_k\frac{\bar{g_{k+1}}}{\|\bar{g_{k+1}}\|_\infty + \delta}$$

$$\lambda_k = \frac{\lambda_0}{1 + k^{\frac{2}{3}}}$$

where δ - computational error.

To apply any subradient algorithm we need to calculate the subgradient, and for the subradient we need to calculate the function $vJ(b,c), v \in S(Kc + \bar{x})V^T$.

First we need to calculate the function $e(c_k)$:

Algorithm 1

For each $e(c_k)$ we generate a sequence e_i:

$$e_0 = \begin{cases} e(c_{k-1}) if k > 0 \\ 0 if k = 0 \end{cases}$$

$$e_{i+1} = -\varepsilon(\Sigma I_m^n)^{-1} G(I_m^n e_i + I_{n-m}^n c_k)$$

while($\|e_{i+1} - e_i\|_{l_1} > 2\delta$).

For convergence, it is sufficient that:

$$T_1(\alpha) = -\varepsilon(\Sigma I_m^n)^{-1} G(I_m^n \alpha + I_{n-m}^n c_k)$$

was a non-stretching operator.

Now we can already define the iterations for the calculation $g = vJ(b, c_k)$:

Algorithm 2

$$g = -\varepsilon v\left(\Sigma I_m^n + \varepsilon J\left(G, b(c_k)\right) I_m^n\right)^{-1} J\left(G, b(c_k)\right) I_{n-m}^n$$

$$g = -\varepsilon w(\Sigma I_m^n)^{-1} J\left(G, b(c_k)\right) I_{n-m}^n$$

$$w = v\left(E_m + \varepsilon(\Sigma I_m^n)^{-1} J\left(G, b(c_k)\right) I_m^n\right)^{-1}$$

To find $w(c_k)$, we apply the algorithm:

$$w_0 = \begin{cases} w(c_{k-1}) if k > 0 \\ v if k = 0 \end{cases}$$

$$w_{i+1} = v - \varepsilon w_i (\Sigma I_m^n)^{-1} J\left(G, b(c)\right) I_m^n$$

while($\|w_{i+1} - w_i\|_{l_1} > 2\delta$)

For convergence, it is sufficient that:

$$T_2(\alpha) = v - \varepsilon\alpha(\Sigma I_m^n)^{-1} J\left(G, b(c)\right) I_m^n$$

was a non-stretching operator.

V. Acknowledgments

The work was carried out with the financial support of the National Academy of Sciences of Ukraine (project "Нові субградієнтні та екстраградієнтні методи для негладких задач регресії", 0124U002162).

References

[1] Candès, E. J., Romberg, J., & Tao, T. (2006). Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. IEEE Transactions on information theory, 52(2), 489-509.

[2] Wang, Y., Hua, Y., Candes, E. J., & Pilanci, M. (2025). Overparameterized relu neural networks learn the simplest model: Neural isometry and phase transitions. IEEE Transactions on Information Theory.

[3] Parvaresh, F., Vikalo, H., Misra, S., & Hassibi, B. (2008). Recovering sparse signals using sparse measurement matrices in compressed DNA microarrays. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2(3), 275-285.

[4] Yi, J., Jiang, H., Wang, X., & Tan, Y. (2024). A comprehensive review on sparse representation and compressed perception in optical image reconstruction. Archives of Computational Methods in Engineering, 31(5), 3197-3209.

[5] Marques, E. C., Maciel, N., Naviner, L., Cai, H., & Yang, J. (2018). A review of sparse recovery algorithms. IEEE access, 7, 1300-1322.

[6] Ji, S., Xue, Y., & Carin, L. (2008). Bayesian compressive sensing. IEEE Transactions on signal processing, 56(6), 2346-2356.

[7] Gorodnitsky, I. F., & Rao, B. D. (2002). Sparse signal reconstruction from limited data using FOCUSS: A re-weighted minimum norm algorithm. IEEE Transactions on signal processing, 45(3), 600-616.

[8] Daubechies, I., DeVore, R., Fornasier, M., & Güntürk, C. S. (2010). Iteratively reweighted least squares minimization for sparse recovery. Communications on Pure and Applied Mathematics: A Journal Issued by the Courant Institute of Mathematical Sciences, 63(1), 1-38.

[9] Fu, H., Liu, H., Han, B., Yang, Y., & Hu, Y. (2017). A proximal iteratively regularized Gauss–Newton method for nonlinear inverse problems. Journal of Inverse and Ill-posed Problems, 25(3), 341-356.

[10] Zhong, M., Wang, W., & Tong, S. (2022). An asymptotical regularization with convex constraints for inverse problems. Inverse Problems, 38(4), 045007.

[11] Wang, J., Han, B., & Wang, W. (2019). Elastic-net regularization for nonlinear electrical impedance tomography with a splitting approach. Applicable Analysis, 98(12), 2201-2217.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Theoretical research of reinforced concrete materials and their application in the preparation of long-term support zones

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.064

Arzuman G. Gasanov
Military Research Institute
of the National Defense University, Baku, Azerbaijan
https://orcid.org /0000-0002-3642-1689,
gasqhapk@gmail.com, arzuman.hesenov@ mmu.edu.az

Abstract- This article is devoted to a theoretical study of reinforced concrete materials and their use in the construction of long-term strongpoints. The relevance of this research lies in the development of modern methods for determining the strength of reinforced concrete materials as their primary indicator. This is driven by the necessity of using such materials and opens up prospects for their application in the military field. The paper presents a physical and mathematical method for determining the strength of reinforced concrete materials. approaches **Theoretical methods were used. The innovation lies in the integration of physical and mathematical approaches to studying the strength of materials, which allows for the preliminary determination of the use of reinforced concrete materials for military purposes. Determining the strength of reinforced concrete materials, as a scientific result, has important practical implications for the preparation of long-term strongholds.**

Key words-reinforced concrete, permanent firing points, pillbox, hardness module, military fortification.

I. INTRODUCTION

Reinforced concrete strongpoints are defensive military fortifications designed to protect personnel, observation and fire control equipment, equipment, artillery, aircraft, unmanned aerial vehicles, etc. from attack. Unlike blockhouses, which are usually located above ground, shelters are almost always underground. They were widely used during World War I, World War II, and the Cold War for command posts, weapons storage, and warehouses. Shelters can also be used for protection against tornadoes. They must prevent injury to those sheltering within. The shelter door must be at least as strong as the walls. Shelters that are occupied for long periods must be provided with ventilation and air conditioning. Such posts can be destroyed using explosives and various weapons.

The word "bunker" is a Scots word meaning "bench, seat", which was recorded in 1758 as a shortened form of the word "bed". The word may also have Scandinavian origins: Old Swedish bunker means "boards used to protect a ship's cargo". In the 19th century, the word was used to describe a coal bunker in a house or a storage room below the deck of a ship, as well as a sand-filled depression built to protect against hazards. Many underground bunkers were built and used during World War I and World War II, as well as the Cold War[1]

Currently, the Russian Army requires mobile shelters of various sizes, capable of accommodating eight personnel in special operations zones, due to their lighter weight. These mobile shelters are made of spiral-corrugated metal pipes. They protect personnel from high-explosive shells. A mobile shelter with a metal structure weighing 1.8 tons, a diameter of 2 to 2.2 meters, and a heating stove buried in the ground can withstand impacts from 152-mm shells [2].

In the US Army The reinforced concrete panel shelter consists of three types of reinforced concrete slabs, designed to be used as an observation post or a protected firing point for 3-4 soldiers. The dimensions of the Type I slab are from 214 to 243 cm; Type II slabs have the same dimensions from 214 to 243 cm; the dimensions of the Type III slab are 304x274 cm. The thickness of the shelter is 15.24 cm, and it can accommodate mortars of up to 82 mm caliber, howitzers of 105 mm caliber. The concrete arched (semicircular) bunker is also designed to be used as a protected firing point for 4 soldiers. The bunker, measuring 45.7 x 20.3 cm, 1.82 m high and 15.24 cm thick, is designed to withstand small arms fire of up to 7.62 mm caliber, mortar shells of up to 82 mm caliber and howitzers of 105 mm caliber. It protects against shell fire [3].

One of the pressing issues is the study of reinforced concrete materials used in the manufacture of long-term supports.

II. DETERMINATION OF THE MODULUS OF HARDNESS OF REINFORCED CONCRETE MATERIAL

When studying the mechanical properties of reinforced concrete, it is necessary to calculate the Young's modulus and the modulus of elasticity. It is known that Young's modulus is the stress required to stretch the material to its full length $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, where E is Young's modulus (Pa), σ - Stress (Pa), ε -relative strain (dimensionless). For calculating the shear moduli, K bulk elasticity and HN - hardness modulus of reinforced concrete.

$$G = \frac{Y}{2\cdot(1+\nu)},\ K = \frac{Y}{3\cdot(1-2\nu)},\ HN = G \cdot A \cdot e^{-B\cdot T}$$

you can use G the formulas [5]. Here G is the shear modulus, ν is the Poisson's ratio [6, 7, 8], K is the bulk modulus of elasticity, HN is the modulus of hardness, A is a constant value $A = 0{,}0807$, the value of the exponential parameter B is equal to $B = 2.204 \cdot 10^{-3}$1/K. T the temperature of the reinforced concrete material was taken into account in the calculations [6]. The calculation results $T = 300^0K$ are given in Table 1.

Table 1. Calculated values of some mechanical parameters of reinforced concrete materials

No	Name	Value
1	Poisson's ratio	0.2
2	Young's modulus	200 GPa
3	Shear modulus	83 GPa
5	Modulus of elasticity under volume loading	111 GPa
6	Hardness modulus	3.47 2 GPa

III. CALCULATION OF THE THICKNESS OF A REINFORCED CONCRETE WALL LONG-TERM SUPPORT AREAS FOR VARIOUS TYPES OF WEAPONS

Let us assume that M, υ, D and m artillery shells, armed unmanned aerial vehicles, missiles, aerial bombs, etc. are the mass, speed, cross-sectional diameter, and mass of the weapon's explosive, respectively. Let's consider the issue of protecting a reinforced concrete shelter from artillery shells, UAVs, missiles, aerial bombs, etc. [6]. When hitting a shock-resistant shelter, moving artillery shells, UAVs, missiles, aerial bombs, etc. move with decreasing acceleration, and the thickness of the shelter h having covered the distance, he stops. At that moment, he P_1 collides with a shock-resistant shelter. P_2 general impact due to the pressure generated by the explosion$P = P_1+P_2$ This has the same effect as the sum. If we consider the modulus of elasticity of the soil and the material, then PThe pressure resistance condition can be written as:

$$P \le Hm + Hp \qquad (1)$$

Here Hm and Hp are the hardness modulus of the material and soil respectively. Using formulas of simple kinematics and dynamics, P_1 we can determine and P_2:

It is known that. $P_1 = \frac{F_1}{S} = \frac{Ma}{S}$from $\upsilon^2 = 2ah$ the formula $a = \frac{\upsilon^2}{2h}$. Then $P_1 = \frac{M\upsilon^2}{2hS}$it follows. $P_2 = \frac{F_2}{S}$From this $F_2 = \frac{E}{h}$it follows. $E = m \cdot E_1$Since then $P_2 = \frac{E}{h\cdot S}$we obtain. Then condition (1) takes the form

$$\frac{M\upsilon^2}{2hS} + \frac{E}{hS} \le Hm + Hp \qquad (2)$$

can be written as: From this, $h$the thickness of the station's reinforced concrete wall can be determined:

$$h = \frac{M\upsilon^2+2E}{2\cdot S(Hm+Hp)} \qquad (3)$$

where M is the mass of the moving object, m is the amount of explosive, υ is the shape of the moving object, h is the thickness of the concrete shelter material, S is the cross-sectional area (or end face) of the moving object. The cross-sectional area (or vertex) of a moving object (projectile or missile) $S = \frac{\pi D^2}{4}$ can be calculated using the formula. Here D is the diameter of the cross-section (or tip) of the moving object, E_1 is the amount of energy

released during the explosion of 1 kg $4{,}184 \cdot 10^6 C$ of TNT, F_1 and F_2 accordingly, are the forces acting on the reinforced concrete material as a result of the explosion of artillery shells, missiles, UAVs, aerial bombs and explosives in motion.

Computer calculations.

When carrying out calculations, taking into account the values of the elastic moduli of reinforced concrete and the soil layer of 3.472 GPa and 0.059 GPa, respectively, as well as the properties of artillery shells, UAVs, aerial bombs, etc., the values of energy and pressure arising from the explosion of explosives, as well as the thickness of the reinforced concrete shelter material can be calculated using the formulas given above [7, 8, 9, 10]. The calculation results are presented in Tables 2 and 3.

Table 2. Calculation of cover thickness for different types of weapons

Serial number	Name	Weight (kg)	Speed (m /s)	Cross-sectional diameter (m)	Amount of explosive (kg)	Explosion energy (C)	Cross-sectional area of the projectile(m ^{2})	Explosion pressure (Pa)	Wall thickness (m)
1	82mm artillery shell	3.1	211	0.082	0.4	1,673,600	0.00528 0	1.06E+09	0.095
2	105mm artillery shell	14.97	750	0.105	1.38	5,773,920	0.008659	2.22E+09	0.332
3	120mm artillery shell	15:59	820	0.12	3.5 0	14,644,000	0.0113 10	4.32E+09	0.50 7
4	122 mm artillery shell	21.8	565	0.122	3,765	15,752,760	0.0116 90	4.49E+09	0.47 4
5	152 mm artillery shell	43.56	655	0.152	6.73	28,158,320	0.01814 6	5.17E+09	0.924
6	Bayraktar	37.5	100	0.16	6.5	27,196,000	0.020106	4.51E+09	0.11 2
7	Aviation bomb	500	40	0.5	160	669,440,000	0.1963 50	1.14E+10	2.7 30

Table 3. Calculation of cover thickness for different types of weapons
(taking into account the soil layer)

Serial number	Name	Weight (kg)	Speed (m /s)	Cross-sectional diameter(m)	Amount of explosive (kg)	Explosion energy (C)	Cross-sectional area of the projectile (m^2)	Explosion pressure (Pa)	Wall thickness (m)
1	82mm artillery shell	3.1	211	0.082	0.4	1,673,600	0.005281	1.06E+09	0.093
2	105mm artillery shell	14.97	750	0.105	1.38	5,773,920	0.008659	2.22E+09	0.327
3	120mm artillery shell	15:59	820	0.12	3.5	14,644,000	0.0113 10	4.32E+09	0.498
4	122 mm artillery shell	21.8	565	0.122	3,765	15,752,760	0.0116 90	4.49E+09	0.466
5	152 mm artillery shell	43.56	655	0.152	6.73	28,158,320	0.01814 6	5.17E+09	0.909
6	Bayraktar	37.5	100	0.16	6.5	27,196,000	0.020106	4.51E+09	0.11 0
7	Aviation bomb	500	40	0.5	160	669,440,000	0.1963 50	1.14E+10	2,684

III. CONCLUSİON

The construction of long-term reinforced concrete support points can be economically justified.

Using the above method, it is possible to calculate the wall thickness values for long-term reinforced concrete support nodes that are resistant to impact and pressure arising from the explosion of explosives for various types of weapons.

The approximate pressure created by the impact of various weapons and the detonation of explosives is 1.1 GPa. It can reach 5.2 GPa. This poses a very significant risk to personnel working inside a permanent strongpoint and the equipment used. The estimated wall thickness of a reinforced concrete strongpoint to protect against each type of weapon can range from 0.093 meters to 2.73 meters. The obtained results can be used in the manufacture of long-term supports for reinforced concrete materials.

REFERENCES

[1] Bunker. Etymology. (March 2, 2025). https://en.wikipedia.org/wiki/Bunker#bodyContent.

[2] Demidov Anton. (April 17, 2024) Bunkers for Russian military personnel will be built in the Central Military District: [Electronic resource] / URL : https :// www . gazette . ru / army / news /2024/04/17/22810628. shtml ? updated.

[3] Veremeev, Yu. (03/14/2025). Strengthening the US Army. Part 7. Combat buildings for personnel: [Electronic resource] / URL : https://army.armor.photos/fort/us-fort-7.php

[4] Orujov, G., Dashdemirov, M. (2017). Instructions for military fortifications / – Baku: Ministry of Defense of the Republic of Azerbaijan, – 203 p.

[5] Muhammad, I.D. (2014). First-principles calculations of structural, mechanical and thermodynamic properties of cubic zirconia / Ibrahim D. Muhammad, Mokhtar Awang, Othman Mamat [et al.] // World Journal of Nanotechnology and Nanoengineering, 4, pp. 97–103.

[6] Greaves, G. N. (2011). Poisson's ratio and modern materials / G. N. Greaves, A. L. Greaves, R. S. Lakes [et al.] // Nature materials, Volume 10, –pp.823-837.

[7] Flippov, V.A., Toshin, D.S. (2017). Fundamentals of reinforced concrete calculation: electronic textbook / V.A. Flippov, D.S. Toshin. – Tolyatti: TSU Publishing House, – 216 p.

[8] Gasanov, A.G., Bayramov A.A. (2019). Modeling of the electronic structure of the graphene-polyvinylidene fluoride composite material. Solid State Physics, Vol. 61, No. 1, pp. 208-213.

[9] Bayramov, A.A., Gasanov, A.G. (2021). Mechanical properties of materials based on graphene $C_{62}H_{20}$ and polyethylene $(-CH_2-CH_2-)_n$. Technical Physics, Vol. 66, No. 3, pp. 416-421.

[10] Belov, N. N., Yugov, N.T., Kopanitsa, D. G., Yugov, A. A. (2005). Strength Calculation of Structures Made of Concrete and Reinforced Concrete Slabs Under High-Speed Impact. Applied Mechanics and Technical Physics. Vol. 46, No. 3, pp. 165-173.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Problems of effective applications of air defense means against air target activating at low altitudes

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.065

Arzuman Gasanov
Military Scientific Research Institute of National Defense University, Baku, Azerbaijan
https://orcid.org/0000-0002-3642-1689,
arzuman.hesenov@mmu.edu.az

Anar Guliyev
Institute of Military Management of National Defense University, Baku, Azerbaijan,
guliev01071987@gmail.com

Rashad Hasanli
Sumqait State University, Sumqait, Azerbaijan.
rashadhasanli015@gmail.com

Abstract-This paper examines the defeat of various types of air attack weapons, such as fighters, helicopters, cruise missiles, reconnaissance unmanned aerial vehicles, armed unmanned aerial vehicles, drones and kamikazes by air defense systems, taking into account their low-altitude operation. For this purpose, efficiency coefficients are determined that characterize the defeat of low-altitude air attack weapons by anti-aircraft missile systems, taking into account their tactical and technical characteristics. To solve the problem, the first party was considered to be air attack weapons, such as fighters, helicopters, cruise missiles, reconnaissance unmanned aerial vehicles, armed unmanned aerial vehicles, drones and kamikazes, and the second party was considered to be the S-125 2TM, BUK-MB, Barak-8, S-300 PMU2, TOR-M2KM, Patriot MIM-104, Panisir S-1, Nasams-III, Igla-S, Strela-10, OSA-AK(M) anti-aircraft missile systems. Therefore, a mathematical model of the problem was developed using game theory. The obtained problem was solved using the simplex method. It was determined that the TOR-M2KM anti-aircraft missile system, which is an air defense system for engaging low-altitude air attack weapons, can be used primarily against fighters, helicopters, unmanned aerial vehicles, armed unmanned aerial vehicles and unmanned aerial targets during combat operations. Of the air attack weapons, it is proposed to use cruise missiles first of all during combat operations, and kamikazes at the next stage. It is advisable to use the Barak-8 air defense system against cruise missiles. The obtained results can be used in planning the effective implementation of an air defense system against low-altitude air attack weapons.

Keywords-unmanned aerial vehicle, armed unmanned aerial vehicle, air attack weapons, air defense system, radar station, anti-aircraft missile system, mathematical modeling, game theory.

I. INTRODUCTİON

Research into the field of low-flying target engagement is of great importance for the development of modern air defense systems. Such targets are often challenging targets for radar and defense systems. Since, flying at low altitudes, these targets can hide from ground radars and shorten their trajectories with the help of geographical obstacles. Development of high-precision radar systems is of great importance for tracking these targets. Among these technologies are more sensitive radars and AI-based tracking systems to prevent objects flying close to the ground from hiding from radars. Using powerful electronic warfare technologies to prevent such targets. Works to confuse radars, disrupt drone control, and neutralize the target in cooperation with other defense systems. Electro-optical and infrared sensors are widely used to detect visual and thermal signatures of targets. These sensors are especially effective at night and in difficult weather conditions. Using highly maneuverable, fast-moving, and suitable missiles designed to engage targets.

Targets can exploit terrain features such as mountains, buildings, and other natural obstacles. Therefore, effective target detection requires the integration of topographic information and target tracking technologies.

Electronic warfare techniques are used to disrupt or remove radio frequencies of targets. This is especially important to prevent unmanned aerial vehicles from evading defense systems. The use of unmanned aerial vehicles against unmanned aerial vehicles has also become relevant in recent times. The enemy uses both physical destruction methods and signal jamming or deception technologies to neutralize unmanned aerial vehicles.

Air defense systems detect and destroy airborne targets, providing highly sensitive and accurate attacks on low-flying targets, working in conjunction with radar and anti-aircraft missiles. Research into the destruction of these targets, along with the development of new technologies and the modernization of existing defense systems, also has a major impact on the tactics and strategy of future warfare. This area of research is very broad and important from both a technological and tactical point of view. One of the main aspects of

destroying low-flying supersonic targets is the selection of effective missile systems. Modern anti-aircraft missile systems are equipped with high-precision missiles with integrated guidance and control systems capable of effectively destroying low-flying targets in conditions of active maneuvering.

Combining anti-aircraft missile systems into a single air defense system and coordinating the actions of various types of weapons and reconnaissance assets allows creating a powerful air defense system and effectively combating low-flying supersonic targets in various combat scenarios.

Thus, detection and destruction of low-flying supersonic targets by anti-aircraft missile systems is a complex but solvable task due to the integration of advanced technologies, sensor systems and weapons. Modern anti-aircraft missile systems are highly effective and provide reliable protection against low-flying supersonic targets. Currently, planning the effective implementation of detection and destruction of low-flying air attack assets by air defense assets is a pressing issue.

II. LOW ALTİTUDE AİR ATTACK WEAPONS

Low altitude air attack weapons are a technology that provides a significant tactical advantage in military conflicts. They are used to confuse enemy air defense systems through their radar evasion capabilities and low altitude flight. The most common low altitude air attack weapons include:

Fighter, Helicopter, Cruise missile, Unmanned aerial vehicle, Armed unmanned aerial vehicle, Drone and Kamikaze.

Low-altitude air attack vehicles play an important role in the Russian-Ukrainian war, in particular, drones and helicopters are one of the main means of gaining a tactical advantage for both sides. Russia, in particular, widely uses Iranian-made Shahid-136 kamikaze drones. These drones fly at low altitudes, and due to their small size and high speed, they are difficult to detect by radar. They are programmed to accurately hit targets and are used against Ukrainian infrastructure, energy facilities and military bases. Ukraine widely uses the Bayraktar TB2 unmanned aerial vehicle. This unmanned aerial vehicle operates at low and medium altitudes, destroying ground targets such as tanks and air defense systems. Low-altitude combat helicopters are the primary firepower for both sides. For example, Russian Ka-52 and Mi-28N helicopters try to destroy targets by maneuvering quickly. They provide a powerful fire system against both tanks and air defense systems. Ukraine, on the other hand, uses Soviet-made helicopters such as the Mi-8 and Mi-24 supplied by the West. Russia and Ukraine are also trying to integrate new generation drone and helicopter technologies into the battlefield. They feature higher speed, low-altitude flight capabilities, and improved maneuverability. In the Karabakh War (2020), Turkish-made Bayraktar TB2 unmanned aerial vehicles were successfully used by Azerbaijan. They flew at low altitudes and attacked Armenian tank, anti-aircraft missile and artillery systems. Harop kamikaze drones (Israeli-made), hidden from radar, were used to destroy Armenian air defense systems. However, manned aircraft also participated in the battles. In particular, the Azerbaijani Air Force used Su-25 attack aircraft against the Armenians. In turn, the Armenian Air Force had 14 pieces Su-25K and 1 piece Su-25UB aircraft. During this war, the first Su-25 was lost by the Armenian Air Force. After the destruction of the main part of the air defense systems in Karabakh, the Su-25 attack aircraft of the Azerbaijani Air Defense were used to strike the positions of the main enemy forces. In particular, they were used in the direction of Jabrayil. The strikes were carried out from high altitudes with FAB-250 and FAB-500 high-explosive aerial bombs.

Laser-guided munitions were also used. Their Bayraktar unmanned aerial vehicle had the advantage that attack drones could not lift munitions of similar power. During the Second Karabakh War, in addition to aircraft, helicopters were also actively used. LAHAT and SPIKE-NLOS missiles mounted on combat helicopters carried out precise strikes on targets. Active interference with detected air defense systems was also provided by Tigon electronic warfare systems from Mi-17 helicopters. During the fighting, one Mi-17 helicopter was shot down by Armenian air defense. Armenian pilots had extensive experience, having flown in mountainous terrain for a long time. Therefore, using the terrain, they carried out combat sorties on Su-25 aircraft at low and ultra-low altitudes and carried out air strikes on groups of troops of the Azerbaijani army. In total, the Armenian side lost 5 (five) Su-25 aircraft during the fighting[1]. In the war between Azerbaijan and Armenia, it can be concluded that the role of attack aircraft in modern armed conflicts is declining with the advent of attack drones. Aircraft designed to strike targets from low altitudes are vulnerable to an enemy with outdated air defense systems. If the aircraft is damaged, the loss of the pilot is very likely, which often requires the use of attack drones instead of attack aircraft.

During the Syrian civil war, various armed groups and states in Syria and Iraq made extensive use of drones. Armed groups supported by Iran and the Russian military made extensive use of drones for low-altitude attacks. Mi-24 helicopters were one of the main attack aircraft of the Syrian regime. They provided close support to ground troops at low altitudes and played the role of the main weapon against anti-government forces. The Syrian regime used Mi-8 and Mi-17 helicopters to drop barrel bombs on civilian areas. These bombs caused great destruction when dropped from the air, causing civilian casualties. The Russian Air Force used these advanced attack helicopters in military operations in Syria with the Ka-52 Alligator and Mi-28N Night Hunter helicopters. Flying at low altitudes, they carried out effective attacks on tanks, artillery, and armed militants. The Mi-24 and Mi-35 helicopters were also highly maneuverable and provided close fire support to ground troops.

Both the Syrian regime and Russian forces used a variety of reconnaissance drones during the conflict. These drones flew at low altitudes to conduct surveillance and reconnaissance operations on the battlefield. They located militants and weapons systems,

and then relayed the information to military aircraft or artillery attacks. Iranian-backed armed groups, particularly Hezbollah and other Shiite militias, have used Iranian-made attack drones. These drones fly at low altitudes and attack opposition forces conducting combat operations against regime forces. Russian Orlan-10 reconnaissance and targeting drones have been used to locate targets and pinpoint coordinates during the conflict in Syria. The drones have been used for airstrikes during the Syrian civil war and for border patrols on Iran's eastern border. Together with the Shahed 129, they are expected to form the backbone of Iran's high-tech drone fleet for at least the next decade. [2] Low-altitude drones were used extensively by Turkey and the United Arab Emirates during the Libyan civil war. Turkish Bayraktar TB2 drones were used by forces supporting the Tripoli government, while the UAE used Chinese Wing Loong drones. At various points in the war, both sides used Mi-24 and Mi-17 helicopters. Electronic defense systems and man-portable air defense systems were used with limited effectiveness against drones and helicopters.

During the war in Yemen, the Houthis used Iranian-made drones to attack Saudi Arabia's oil infrastructure and military bases.

Saudi Arabia's defensive tactics: Saudi Arabia attempted to counter these attacks using Patriot systems and man-portable air defense systems. Thus, the main advantages of low-flying air attack weapons are their difficulty in detecting radar, their high maneuverability, and their ability to be used effectively in large-scale combat.

Modern radar systems and electronic warfare systems are essential for effective defense against low-altitude aircraft. Mobile anti-aircraft artillery and anti-aircraft missile systems also play an important role in countering low-altitude attacks. New drone technologies and electronic warfare systems are constantly changing the development of these vehicles and the fight against them. Low-altitude aircraft are widely used in modern warfare to provide tactical advantage, and it is important to develop defensive strategies against them.

III. AİR DEFENSE SYSTEMS

One of the main aspects of defeating low-flying supersonic targets is the choice of effective missile systems. Modern anti-aircraft missile systems are equipped with high-precision missiles with integrated guidance and control systems capable of effectively hitting low-flying targets even in conditions of active maneuvering.

"Panser-S1" (Figure 1) is a short-range anti-aircraft missile and gun system mounted on a tracked chassis, a wheeled chassis of a truck, a trailer or installed stationary. Control is carried out by two or three operators. Air defense is carried out by automatic weapons and radio command missiles with infrared and radar tracking. The complex is designed to protect small objects from air attack. In addition, the complex is capable of fighting lightly armored ground targets, as well as enemy manpower. The Pancer-C1 complex is a multi-channel tracking system that creates a continuous target acquisition zone for missile and artillery weapons at ranges from 0 m to 200 m. It is capable of destroying targets at an altitude of up to 15 km and a range of up to 20 km without external support. The fire control system of the Pancer-C1 complex includes detection and tracking radar stations. They provide tracking of both targets and anti-aircraft missiles launched by the complex. The detection range of these radar stations is 32-36 km for targets with an effective reflection area of 2 m2. The maximum detection range of the station is 80 km. In addition to the radar, the fire control system also includes an optical-electronic complex with a long-wave receiver (infrared homing head). The entire system can operate fully automatically [3, 4, 5].

During the military operations in Syria, Turkey took the tactics of using drones to a new level. At the first stage, its target was not the illegal irregular formations of Syria, but the regular army and military equipment. At the second stage, a larger unmanned aerial vehicle, the ANKA complex, equipped with electronic warfare systems, was used to destroy the air defense system as part of the Bayraktar-TB2 unmanned aerial vehicle group. With the help of the electronic warfare systems of the ANKA unmanned aerial vehicle, it was possible to suppress the radar system of the Pancer-C1 complex (Figure 1), which in turn allowed the Bayraktar-TB2 unmanned aerial vehicle to enter the kill zone of the Pancer-C1 complex and strike it [6]. The Zenith-rocket system OSA air defense missile system (Figure 2) is designed to destroy standard air targets at a distance of 1.5–10 km, at an altitude of 25 m to 5 km. The target detection range is up to 45 km. Equipped with 6 anti-aircraft guided missiles. The probability of hitting an air attack vehicle of the "aircraft" type is 0.5 - 0.85. The reaction time is 16-26 seconds [6, 7]. At the same time, the experience of combat use of the zenith-rocket system OSA system in the wars in Yugoslavia and Libya showed that it is ineffective against targets with a small effective reflection area and flying at altitudes of up to 50 m.

The Strela-10 anti-aircraft missile system (Figure 3) can hit air targets at an altitude of 0.01-3.5 km and a range of 0.8-5 km (the probability of hitting with one missile is 0.3–0.6). The reaction time of the system is 7-10 seconds [7].


Fig. 1. Pantsir-C1


Fig. 2. Zenith-rocket system OSA


Fig. 3. Anti-aircraft missile complex "Strela-10"

Both of these anti-aircraft missile systems were primarily designed to combat army aircraft and helicopters. Their capabilities against unmanned aerial vehicles were limited. However, during the joint exercises of the Air Defense Forces of Armenia and Russia in June 2020, according to Russian military experts, these air defense systems were recognized as effective against Azerbaijani unmanned aerial vehicles. The reason for such opinions was the successful interception of a single-seat Hermes 900 reconnaissance aircraft by the OSA air defense system [6]. The Patriot-MIM-104 is an American anti-aircraft missile system used by the US Army and the armies of a number of other countries (Figure 4). The system uses universal radars that perform the functions of target detection and tracking, as well as target designation and missile control. The multifunctional radar is designed to detect, track and illuminate targets with a main transmitting phased array diameter of 2.44 meters, track missiles and transmit commands [9]. The wavelength of the system is 5.5 - 6.7 cm, it operates in the range of 4 - 6 GHz, the search mode is from +45 to -45 ° in azimuth, at an elevation angle of 1 ° -73 °, the tracking sector is from +55 to -55 ° in azimuth, at an elevation angle of 1 ° -83 °, the detection range is 70 km with an effective target reflection area of 0.1 m² and 180 km at an elevation angle of 10 m². It can simultaneously track up to 125 targets and simultaneously control up to 6 missiles. The range of destruction is a minimum of 3 km, maximum 80 km, and the altitude is a minimum of 0.06 km, maximum 25 km [8]. Nasams is a mobile Norwegian anti-aircraft missile complex designed to combat aerodynamic targets maneuvering at low and medium altitudes. He can destroy unmanned aerial vehicles, ballistic missiles, helicopters, airplanes, cruise missiles and other targets. Nasams refers to short- and medium-range air defense systems, and depending on the missiles used, the range of damage can be 20-50 km (Figure 5).


Figure 4. Anti-aircraft missile complex Patriot MIM-104


Figure 5. Anti-aircraft missile complex Nasams-III

Let's consider the tactical and technical characteristics of the means of fire defense, intended for defeating unmanned aerial vehicles. According to Russian manufacturers, the following types of weapons are effective against unmanned aerial vehicles: anti-aircraft missile systems "TOR-M1", "TOR-M2E", "BUK-M2E", "BUK-M3", "Morpheus", "Vityaz", anti-aircraft missile guns "Pantsir C1" and "Sosna". Versatıle counteractıve complex "TOR" is considered effective against hard-to-detect targets, as it is designed to combat high-precision weapons and cruise missiles. Anti-aircraft missile complex "TOR-M1" detects and accompanies 48 targets at a distance of up to 27 km, at an altitude of 0.01-9 km and destroys them at a distance of 1–12 km. The number of simultaneously fired targets - 2. The reaction time of the complex -7.4 seconds. Modification "TOP-M2Э" now shoots 4 targets simultaneously. In the "TOP-M2У" variant, the combat kit is increased from 8 rockets to 16 rockets.

The results of the 44-day war between Azerbaijan and Armenia in 2020 are still being studied, and the experience of tactics implemented by Azerbaijan is used all over the world. Thus, from the beginning of the conflict, among the air defense systems of Armenia were such systems as zenith missile system "Osa-AK(M)", "Krug", "Kub", S-125, S-300PS and "TOR-M2KM". With the help of these systems, the Armed Forces of Armenia fulfilled the task of protecting the airspace in the Karabakh region of Azerbaijan. However, the high maneuverability, low-altitude capabilities and accurate weapons of the Azerbaijani Bayraktar TB2 unmanned aerial vehicles allowed them to gain an advantage over the Armenian air defense systems. The effective use of unmanned aerial vehicles by the Azerbaijani army reduced the effectiveness of Armenia's air defense systems. Although, according to Russian military experts, the joint exercises of the Armenian-Russian air defense forces in June 2020 made it possible to draw conclusions about the high combat qualities of this air defense system[9].

Armed forces of Azerbaijan, taking into account the experience of local wars, started the war in Karabakh with the use of a large group of unmanned aerial vehicles. In the first days of the war, it became clear that Armenia

is completely unprepared for anti-aircraft defense with the intensive use of unmanned aerial vehicles. This led to the almost complete destruction of the Armenian zenith missile system "Osa-AK(M)" in Karabakh during the first days. On the first days of the military operation, more than 60% of Karabakh air defense systems (14 pieces "Osa-AK(M)") were disabled by pre-prepared strikes on air defense systems. At the same time, since such Armenian air defense systems as "S-300PS" and "S-300PT" were not designed to fight unmanned aerial vehicles, these systems were not effectively used to protect against new threats on the first day of the war. In addition, as a result of a successful operation planned by the Air Force of Azerbaijan, the air defense system "S-300PS" was destroyed by an unmanned aerial vehicle. The outcome of this war shows that the effectiveness of the above-mentioned air defense systems against unmanned aerial vehicles, which are modern means of air attack, is low.

IV. STUDY OF THE DESTRUCTİON OF AİR ATTACK WEAPONS OPERATİNG AT LOW ALTİTUDES

Let us assume that the values of the conditional coefficients characterizing the effectiveness of the use of the S-125 2TM, BUK-MB, Barak-8, S-300 PMU2, TOR-M2KM, Patriot MIM-104, Pantsir S-1, Nasams-III, IGLA-S, Strela-10 and OSA-AK(M) air defense systems against low-altitude air targets such as fighters, helicopters, cruise missiles, unmanned aerial vehicles, armed unmanned aerial vehicles, drones and kamikazes are given in Table 1. To study the effectiveness of the use of the S-125 2TM, BUK-MB, Barak-8, S-300 PMU2, TOR-M2KM, Patriot MIM-104, Pantsir S-1, Nasams-III, Igla-S, Strela-10 and OSA-AK(M) against low-flying air attack weapons such as fighters, helicopters, cruise missiles, unmanned aerial vehicles, armed unmanned aerial vehicles, drones and kamikazes, we consider air defense systems as the first side, and air attack weapons as the second side. Then the problem can be considered as a game of two players. The solution to the problem can be obtained using the simplex method [10, 11, 12, 13, 14]. Using the above methodology and Table 1, the lower $\alpha = \max_i \min_j a_{ij} = 0.721 = 0.721$ and the upper $\beta = \min_j \max_i a_{ij} = 0.833$ values of the effectiveness of air defense weapons against air attack weapons are obtained.

Table 1. The coefficients of effectiveness of defense means for targets operating at low altitudes are given conditionally

Serial number	Air Defense Systems	Low altitude targets							
		Fighter	Helicopter	Cruise missile	Unmanned aerial vehicle	Armed unmanned aerial vehicle	Drone	Kamikaze	$\alpha_i = \min_j a_{ij}$
1	S-125 2TM	0.652	0.853	0.454	0.801	0.791	0	0	0
2	BUK-MB	0.711	0.891	0.651	0.871	0.852	0	0	0
3	Barak-8	0.971	0.981	0.956	0.972	0.981	0	0	0
4	S-300 PMU2	0.892	0.952	0.882	0.982	0.973	0	0	0
5	TOR M2KM	0.731	0.752	0.721	0.861	0.853	0.842	0.833	0.721
6	Patriot MIM-104	0.724	0.854	0.681	0.843	0.834	0.813	0.824	0.681
7	Pantsir S-1	0.704	0.784	0.684	0.754	0.734	0.684	0.694	0.684
8	Nasams-III	0.784	0.879	0.769	0.849	0.839	0	0	0
9	Igla-S	0.539	0.648	0	0.527	0.519	0.501	0.509	0
10	Strela-10	0.538	0.629	0	0.387	0.379	0.369	0.346	0
11	OSA-AK(M)	0.536	0.686	0	0.667	0.658	0.638	0.645	0
$\beta_j = \max_i a_{ij}$		0.971	0.981	0.956	0.982	0.981	0.842	0.833	

That is, in this case $\alpha \neq \beta$, determining the effectiveness of using air defense systems against air attack systems is reduced to solving the following conjugate linear programming problems:

Objective function:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{m} x_i \to min \quad (1)$$

Restriction conditions:

$$A^T \cdot x \geq b \quad (2)$$

$$x \geq 0. \quad (3)$$

$$p_i = x_i \cdot v, p_i \geq 0,\ i = 1, 2, \ldots, m \quad (4)$$

$$v = \frac{1}{fmin(x)},\ v > 0. \quad (5)$$

Objective function:

$$z(y) = \sum_{i=1}^{n} y_i \to max \quad (6)$$

Restriction conditions:

$$A \cdot y \leq b \quad (7)$$

$$y \geq 0. \quad (8)$$

$$q_j = y_j \cdot v, q_j \geq 0,\ j = 1, 2, \ldots, n \quad (9)$$

$$v = \frac{1}{Zmax(y)},\ v > 0. \quad (10)$$

Where m - is the number of air defense systems, n – is the number of air attack systems, p_i - is the probability of using the i-th air defense system, q_j -is the probability of using the j-th air attack system, v - is the numerical value of air defense systems from air attack systems,

$x_i = p_i/v, \quad i = 1, 2, \dots, m, \qquad y_j = q_j/v, \quad i = 1, 2, \dots, n$

A -is the matrix of efficiency coefficients with m rows and n columns, A^T - is the transposed matrix of matrix A. Thus, the use of air targets such as fighters, helicopters, cruise missiles, unmanned aerial vehicles, armed unmanned aerial vehicles, drones and kamikazes operating at low altitudes, and the effective use of air defense systems such as the S-125 2TM, BUK-MB, Barak-8, S-300 PMU2, TOR M2KM, Patriot MİM-104, Pantsir S-1, Nasams-III, Igla-S, Strela-10 and OSA-AK(M) in relation to them can be refined based on finding the values $q_j \geq 0, \ i = 1, 2, \dots, n$ and $p_i \geq 0, \ i = 1, 2, \dots, m$. For this purpose, the following results were obtained by solving problems (1) - (3) and (6) - (9) using the simplex method [15, 16, 17]:

$x = (0, 0, 0.141, 0, 1.2, 0, 0, 0, 0, 0, 0), \qquad fmin(x) = 1.341, \ v = 0.75,$

$p = (0, 0, 0.105, 0, 0.895, 0, 0, 0, 0, 0, 0);$

$y = (0, 0, 1.046, 0, 0, 0, 0.295), \qquad Zmax(y) = 1.341, \ v = 0.75,$

$q = (0, 0, 0.780, 0, 0, 0, 0.220).$

The obtained results show that the probability of using the TOR zenith missile system is 0.895. This means that during combat operations it is advisable to use the TOR zenith missile system first. The Barak-8 zenith missile system can also be used during combat operations, the probability of using which is 0.105. Since among air attack weapons the probability of using a cruise missile is 0.780, and the probability of using a kamikaze is 0.220, it is expected that the cruise missile will be used first, and then the kamikaze during combat operations. In a particular case, we will also consider the use of air targets such as low-altitude fighters, helicopters, cruise missiles, unmanned aerial vehicles and armed unmanned aerial vehicles, the effectiveness coefficients of which are given in Table 2, and the effective use of air defense systems against them, such as the S-125 2TM, BUK-MB, Barak-8, S-300 PMU2, TOR, Patriot, Pantsir S-1 and Nasams-III. Using the above methodology and Table 2, we obtained the lower $\alpha = \max_i \min_j a_{ij} =$ 0.956 and the upper $\beta = \min_j \max_i a_{ij} = 0.956$ values of the effectiveness of using air defense systems against air attack weapons [15, 16, 17, 18, 19, 29, 21, 22]. This means that an air target operating at low altitudes could be a cruise missile, and it would be appropriate to use the Barak-8 air defense missile system against it.

Table 2. The efficiency coefficients of specially selected means of protection against targets operating at low altitudes are given conditionally.

Serial Number	Air Defense Systems	Low altitude targets					
		Fighter	Helicopter	Cruise missile	Unmanned aerial vehicle	Armed unm aerial vehicl	$\alpha_i = \min_j a_{ij}$
1	S-125 2TM	0.652	0.853	0.454	0.801	0.791	0.454
2	BUK-MB	0.711	0.891	0.651	0.871	0.852	0.651
3	Barak-8	0.971	0.981	0.956	0.972	0.981	0.956
4	S-300 PMU2	0.892	0.952	0.882	0.982	0.973	0.892
5	TOR M2KM	0.731	0.752	0.721	0.861	0.853	0.721
6	Patriot MIM-104	0.724	0.854	0.681	0.843	0.834	0.681
7	Pansır S-1	0.704	0.784	0.684	0.754	0.734	0.684
8	Nasams-III	0.784	0.879	0.769	0.849	0.839	0.769
$\beta_j = \max_i a_{ij}$		0.971	0.981	0.956	0.982	0.981	

V. CONCLUSİON

Thus, it is necessary to pay special attention to these results in effective planning when using zenith missile systems against low-altitude air attack weapons. Thus, in modern wars, in order to achieve and constantly maintain air superiority and maintain it, it is necessary to take into account all the parameters of anti-aircraft missile systems, and effective planning can be carried out as a result of minimizing value. The results show that since the probability of using the TOR-M2KM zenith missile system is 0.895, it is advisable to use it primarily against fighter aircraft, helicopters, unmanned aerial vehicles, armed unmanned aerial vehicles and drones during combat operations. The Barak-8 defense system with a deployment probability of 0.105 can also be used in combat. Since the deployment probability of cruise missiles is 0.780 and the deployment probability of kamikazes is 0.220, it is expected that cruise missiles will be used primarily in combat, with kamikazes also being used for air strikes. In a specific case, based on the data given in Table 2, a low-altitude air target may be a cruise missile, and it is appropriate to use the Barak-8 as an air defense against it.

REFERENCES

[1] Dmitry, Valyuzhenich. (January 8, 2021). Su-25 attack aircraft in the Second Karabakh War: [Electronic resource] / anna-news. URL: https://anna-news.info/shturmoviki-su-25-na-vtoroj-karabahskoj-vojne/

[2] Babak, Taghvaee. (July 27, 2017). Shahed – 129 heads Iran's Armed UAV Force. Aviation Week & Space Technology: [Electronic resource] / URL: https://aviationweek.com/defense/shahed-129-heads-irans-armed-uav-force.

[3] Anti-aircraft missile and gun system 96K6 "Pantsir-S1".(August 9, 2007). Comparative characteristics of domestic air defense missile and gun systems: [Electronic resource] / URL: http://pvo.guns.ru/panzir/data.htm

[4] Aminov, S. (August 9, 2007). The long road to "Pantsir": [Electronic resource] / URL: http://pvo.guns.ru/panzir/.

[5] Makarenko, S.I. (2020). Counteraction to unmanned aerial vehicles / S.I. Makarenko. - St. Petersburg: Science-intensive technologies, - 204 p.

[6] Soviet air defense missile system OSA. (April 29, 2019). : The history of its creation, description and technical characteristics: [Electronic resource] / URL: https://militaryarms.ru/voennaya-texnika/boevye-mashiny/Zenith-raket sistemi-osa/

[7] Weapons and technologies of Russia. (2004).: Encyclopedia of the 21st century. Air defense and missile defense / Under the general editorship of S. Ivanov. - Moscow: Weapons and technologies, - v. 9- 752 p.

[8] Parsch, Andreas. (April 11, 2015). "Raytheon MIM-104 Patriot".: [Electron resurs] / Directory of U.S. Military Rockets and Missiles. Archived from the original URL: https://en.wikipedia.org/wiki/MIM-104_Patriot

[9] Tuchkov, V. (October 6, 2020). Yerevan has already lost the air phase of the battle for Karabakh: [Electronic resource] / Free Press. URL: https://svpressa.ru/war21/article/277832/.

[10] Samarov, K.L. (2009). Elements of game theory. / K.L.Samarov. - Moscow: OOO "Resolventa", - 24 p.

[11] Gasanov, A.G., Kerimov, Ya.Sh. (2023). Study of the Possibilities of Using Unmanned Aerial Vehicles at the Operational-Tactical Level. Journal of National Security and Military Sciences, - Baku: 3(9), - pp. 40-46.

[12] Gasanov, A.G. (2018). Solving problems of mathematical modeling of military systems. Textbook. - Baku: Military Publishing House, - 120 p.

[13] Mathcad: [Electronic resource] / Wikipedia the free an encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mathcad

[14] Gasanov, A.G., Karimov, Y.Sh. (2023). Optimal management of the application of a group of unmanned aerial vehicles (UAVs) of the same type to different targets. Journal of Defense Resources Management, Brasov – Romania, vol. 14, issue 2 (27), –pp.125-130.

[15] Rustamov A.R., Gasanov A.G., Azizullayev, M.G. (2024). Effective application of telemetry systems of unmanned aerial vehicles. //– Modern directions development information and communication technology and means management Thesis reports fourteenth international scientific and technical Conference April 25-26, Volume 2: sections 3, 4, 5, 6, pp. 66-70.

[16] Rustamov, A.R., Gasanov, A.G., Azizullayev, M.G. (2024). The role of navigational and hydrographical support in ensuring security of the Caspian Sea. 2nd International Conference on Logistics, Transport and Distribution in the Caspian Region, May 15-17, Baku, Azerbaijan.

[17] Rustamov, A.R., Gasanov, A.G., Azizullayev, M.G. (2024). Analysis of modules and systems used in effective control of UAVs in radio electronic combat environment. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Тези доповідей чотирнадцятої міжнародної науково-технічної конференції 25 - 26 квітня, pp. 47-48, doi: https://doi.org/10.32620/ICT.24.t1

[18] Gasanov, A.G., Karimov, Y.Sh. (2024). Methodology for effective planning of means of destruction located in the cover and in the stern for various types of targets. Voenen Zhurnal, Sofia, Bulgari. 2(131), pp. 207-213.

[19] Gasanov, A., Guliyev, G., Hasanli, R. (2025). Problems of optımal plannıng of aır defense means agaınst low-altıtude aır targets. Збірник наукових праць 3 матеріалами IX міжнародної наукової конференції. м. Вінниця, Україна, МЦНД, pp.409-418. https://doi.org/10.62731/mcnd-23.05.2025.012.

[20] Abdullaeva, A. J., Huseynov, A.G., Gasanov, A.G., Suleymanov, I. I., Nasirov, E.V. (2025). Analysis of the functioning of an atmospheric acousto-optical locator with an electronic scanner. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Current directions of development of information and communication technologies and control tools: тези доп. п'ятнадцятої міжнар. наук.-техн. конф., 24-25 квітня, Том 4: секція 6, с.80-81.

[21] Rüstəmov, Ə., Hüseynov, Ə., Həsənov, A., Abdullayeva, A. (2025). Passiv radiolokasiya sistemində akustooptik qəbuledicilərin tətbiqinin aktual aspektləri. Azərbaycan Respublikasinin inkişaf strategiyasi: potensial imkanlar və yeni çağırışlar adlı konfrans materialı, s.214-219.

[22] İslamov, İ., Axundov, R., Həsənov, A., Abdullayeva, A. (2025). Radioelektron sistemlərin ifrat yüksək tezlikli elektromaqnit şüalanmadan qorunmasi problemləri. Heydər Əliyevin dövlət təhlükəsizliyi siyasəti: tarixi nailiyyətlər və müasir çağırışlar adlı respublika elmi-praktik konfrans, Vol. 2, s.25-29.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Mathematical Modeling of Coupled Wagon Movement on a Railway Hump

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.066

Arif Hasanov
National Defense Universityt
Baku, Azerbaijan
arif.h.hasanov@gmail.com

Elkhan Sabziev
Laboratory of modeling and control of continuous processes
Institute of Control Systems,
National Defense Universityty
Baku, Azerbaijan
elkhan.sabziev@ieee.org

Adalat Pashayev
Laboratory of modeling and control of continuous processes
Institute of Control Systems,
National Defense Universityty
Baku, Azerbaijan
adalat.pashayev@gmail.com

Shukhrat Saidivaliev
Department of Freight Transport Systems at Tashkent State Transport University
Tashkent, Uzbekistan
shuxratxoja@mail.ru

Matluba Khadzhimukhametova
Education Department at Tashkent State Transport University
Tashkent, Uzbekistan
matluba_78@mail.ru

Esmira Mamedova
Laboratory of modeling and control of continuous processes
Institute of Control Systems
Baku, Azerbaijan
mammadova.esmira@gmail.com

Abstract—**The efficiency of classification yards is largely determined by the process of controlled humping of railwagons. This paper proposes a mathematical model for calculating the group speed of several coupled wagons (cuts) as they move over a hump. The proposed model is formulated as a Cauchy problem for the Cauchy problem for a Riccati-type nonlinear differential equation, taking into account the basic and additional specific rolling resistance of the wagons, which depend on their mass, type, and operating conditions. Both the forward problem (determining the speed at the end of the hump for a given initial speed) and the inverse problem (determining the required initial speed to achieve a specified speed at the end of the hump) are considered. The proposed approach enables numerical experiments using Euler and Runge–Kutta methods. The results can be applied in the design and operation of modern automatic control systems at classification yards, contributing to increased productivity, energy efficiency, and operational safety.**

Keywords—Mathematical modeling, classification yard in railway, direct calculation problem, inverse calculation problem, specific train resistance, ordinary differential equation, Cauchy problem.

I. Introduction

Classification yards are among the most important elements of railway infrastructure, providing the redistribution of car flows and the formation of trains in line with transportation needs. One of the key stages in a yard's technological cycle is the humping of wagons over the classification hump. The accuracy with which this process is controlled determines the system's overall throughput and processing capacity, operational safety, and energy efficiency.

In recent decades, considerable attention has been devoted to developing mathematical models that describe car dynamics during humping. Such models make it possible to predict speed and account for the influence of car mass, type, and axle count, as well as track resistance. Most existing studies consider the dynamics of individual wagons; however, practical tasks often involve the descent of a group of coupled wagons, whose motion is of a more complex nature.

Of particular interest is solving both the forward and inverse calculation problems. The forward problem consists in determining the exit speed from the hump given specified car characteristics and the track profile. The inverse problem makes it possible to determine the required initial speed to achieve a prescribed outcome at the end of the hump. Solving such problems is of great practical significance, as it enables the development of automatic control algorithms and the optimization of classification-hump parameters.

Accordingly, the aim of this study is to construct and investigate a mathematical model of the motion of several coupled wagons over a classification hump, taking into account their key characteristics and resistance to motion. The proposed approach is based on numerical methods for solving differential equations and can serve as a foundation for further research into the automation of classification processes.

II. Problem Formulation

The problem considered is to determine the arrival speed at the end (or beginning) of the descending section of a classification hump for several coupled railwagons on $1520[mm]$ gauge track. The mass of each car, the car type, and the axle count (four-, six-, or eight-axle) are assumed to be known, and all wagons are on roller bearings. The classification hump is modeled as a sequence of straight segments with a known gradient

specified in per mille (‰), characterizing the slope angle. Since the total length of the coupled wagons is small compared with the length of the descending hump, the motion of the cut is modeled as a material point located at the cut's center of mass.

It is necessary to describe a mathematical model for calculating the group speed of several coupled wagons on a classification yard, with a known initial speed.

III. Mathematical Model of Motion

Let data be given for N general-purpose freight wagons of $1520[\mathrm{m}m]$ gauge on roller bearings, indexed by $j = 1,2,\dots,N$. The data consist of m_j -the gross mass of car j, and coefficients a_j, b_j, c_j, which are, respectively, the mass fractions of four-, six-, and eight-axle wagons in the consist [1,2], determined from Tables I and II.

TABLE I. COEFFICIENTS a_j, b_j, c_j, WHEN $m_j > 6000[KG]$

General purpose carriages on roller bearings	*Path characteristics*	*a*	*b*	*c*
4-axle	*Linked*	3.0	0.100	0.0025
6-axle		8.0	0.100	0.0025
8-axle		6.0	0.038	0.0021
4-axle	*Stickless*	3.0	0.090	0.0020
6-axle		8.0	0.080	0.0020
8-axle		6.0	0.026	0.0017

TABLE II. COEFFICIENTS a_j, b_j, c_j, WHEN $m_j \le 6000[KG]$

General purpose carriages on roller bearings	*Path characteristics*	*a*	*b*	*c*
4-axle	*Linked*	1	0.044	0.00024
6-axle		1	0.044	0.00024
8-axle		-	-	-
4-axle	*Stickless*	1	0.042	0.00016
6-axle		1	0.042	0.00016
8-axle		-	-	-

As a first approximation, we will neglect the effect of the oncoming airstream. In this case, only the basic and additional specific resistance forces act on a unit mass of the wagons; denote them by W_0 and $gI(x)$, respectively. Here $g = 9.81[m/sec^2]$ is the acceleration due to gravity, and $I(x)$ is the grade in per mille (‰), determined by the design of the descending hump and dependent on the track section, as indicated by the argument x.

Let the hump consist of n straight sections of lengths L_k, $k = 1,2,\dots,n$ (typically $n = 3$), with grades I_k. Then $I(x)$ can be represented as

$$I(x) = I_k, \quad \text{if} \quad \sum_{i=1}^{k-1} L_i \le x < \sum_{i=1}^{k} L_i.$$

Then the kinematic equation of motion of the cut on the k -th section can be written as:

$$\frac{dv}{dt} = W_0(v) + gI_k, \quad t \ge 0, \tag{1}$$

where t is time, v is the train's speed, and $W_0 = W_0(v)$ is the basic specific resistance to motion, which depends on the composition of the cut and its speed. According to [1], the formula for determining $W_0(v)$ is written as follows:

$$W_0(v) = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{N} m_j W_{0j},$$

where m_j and W_{0j} are, respectively, the gross mass and the basic specific resistance of the j -th car, and $m = \sum_{j=1}^{N} m_j$.

In accordance with [1,2], the specific resistance to motion W_{0j} depends nonlinearly on the speed v (in $[km/h]$) and is determined differently depending on the gross mass m_j. Specifically, for $m_j > 6000[kg]$

$$W_{0j} = g \cdot \left(0.7 + \frac{a_j + b_j v + c_j v^2}{m_j}\right),$$

where a_j, b_j, c_j are, respectively, the mass fractions of four-, six-, and eight-axle wagons in the consist, determined from Table I.

And at $m_j \le 6000[kg]$

$$W_{0j} = g \cdot \left(a_j + b_j v + c_j v^2\right),$$

where a_j, b_j, c_j are determined from Table II.

In accordance with the assumption that the k -th section of the classification hump is straight, each section can be represented by the interval $[L_{k-1}, L_k]$. We assume that at time $t = 0$ the consist begins to move with a known initial speed v_0, i.e.,

$$v(0) = v_0. \tag{2}$$

Let t_k denote the instant at which the motion transitions from the segment $[L_{k-1}, L_k]$ to the segment $[L_k, L_{k+1}]$. Then the following equality holds:

$$\int_0^{t_k} v(\tau)\, d\tau = \sum_{i=1}^{k} L_i. \tag{3}$$

Meanwhile, the time interval spent on the track segment $[L_{k-1}, L_k]$ is determined by the inequality

$$t_{k-1} \le t \le t_k, \tag{4}$$

where $t_0 = 0$.

IV. THE DİRECT PROBLEM

The direct problem of computing the train speed is as follows: to determine the speed of a consist of N wagons with known characteristics m_j, a_j, b_j, c_j given the known lengths and grades of the track sections. For this purpose, differential equation (1) subject to condition (2) is solved on the domain $[0,\ L_*]$, where

$$L_* = \sum_{i=1}^{n} L_i$$

From a mathematical standpoint, (1)–(2) is a Cauchy problem for a first-order nonlinear ordinary differential equation (a Riccati equation). In the general case this equation is not integrable in closed form (by quadratures), so numerical methods are used to solve it, for example the Euler or Runge–Kutta methods [3, pp. 63–78; 4, pp. 89–97].

V. THE INVERSE PROBLEM

Of particular interest is the problem of determining the initial speed of the train so that it arrives at the end of the descending hump with a prescribed speed v_*. From a mathematical standpoint, this is an inverse Cauchy problem, and it can typically be solved by substituting t maps to $-t$, whereby the derivative $\frac{dv}{dt}$ is replaced with $-\frac{dv}{dt}$.

The domain of the problem is the interval $[0,\ L_*]$, represented as a sequence of segments

$$\left[\sum_{i=n-k+2}^{n} L_i\,,\ \sum_{i=n-k+1}^{n} L_i\right],$$

where $L_{n+1} = 0$.

The initial condition is then written as

$$v(0) = v_*.$$

And in determining the values of t_k in (4), the following formula will be used:

$$\int_0^{t_k} v(\tau)\,d\tau = \sum_{i=n+1-k}^{n} L_i.$$

VI. CONCLUSION

In the present study, a mathematical model is developed for the motion of a group of coupled railwagons during descent over a classification hump. Unlike many existing investigations that are limited to analyzing the motion of a single car, the proposed approach accounts for the specifics of group motion for wagons of different types and axle counts, enabling a more faithful representation of real operating conditions at a classification yard.

The proposed model is formulated as a Cauchy problem for the Cauchy problem for a nonlinear Riccati-type differential equation that incorporates both the basic and additional specific resistances to motion. These resistances are treated as functions of car speed and mass, which improves the accuracy of the dynamical description. Two problem settings are formulated and examined: the forward problem, which determines the final speed of the cut given a known initial speed, and the inverse problem, which determines the required initial speed to achieve a prescribed terminal speed at the end of the hump.

The practical significance of the study lies in the applicability of the developed model to analyzing the operation of classification yards, designing new humps and modernizing existing ones, as well as developing control algorithms for braking systems. The use of numerical solution methods (Euler, Runge–Kutta, etc.) provides sufficient flexibility and allows the analysis of various hump profiles and changing car characteristics.

The results of the study can help increase the throughput of classification yards, improve the safety of shunting operations, and reduce energy consumption. Future work includes extending the model to incorporate aerodynamic drag, the effects of crosswinds and headwinds, and the interaction of coupled wagons depending on their relative arrangement. Another relevant direction is integrating the developed model into simulation systems for classification-yard technological processes and applying it within intelligent decision-support systems.

REFERENCES

[1] M. Khadjimuhametova, “Improvement of methods of calculation of key parameters of a hump yard for Uzbekistan,” International Journal of Advanced Science and Technology, vol. 29, no. 5, 2020.

[2] M. Khadjimuhametova, A. Merganov, and R. Egamberdiev, “An innovative method of designing the surface and elements of the hump profiles,” AIP Conference Proceedings, vol. 2432, p. 030046, 2022.

[3] Крижанівська Т.В., Бойцова І.А. Конспект лекцій з дисципліни "Чисельні методи". Одеса, 2013. – 152 с.

[4] "Чисельні методи: конспект лекцій " / уклад. Шебаніна О.В., Тищенко С.І., Хилько І.І., Пархоменко О.Ю., Крайній В.О. Миколаїв: МНАУ, 2024. – 100 с.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Comparative Analysis of Localization Methods for Accurate and Robust Positioning

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.067

Ivan Ilnytskyi
Department of Applied Mathematics
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
i.ilnytskyi@gmail.com

Abstract—***Localization, the task of determining position in an environment, is fundamental for robotics, navigation, and tracking [1], [2]. This paper reviews modern approaches with emphasis on mathematical and computational modeling. We compare geometric methods [6], dead-reckoning with sensor fusion [3], [4], graph-based optimization (SLAM) [11], [12], and deep learning techniques [5], [8]. A comparative table highlights their accuracy, robustness, and main trade-offs. The review indicates that multi-sensor fusion and robust estimation improve reliability [3], [4], while deep learning adds potential but requires large datasets and careful design [5].***

Keywords—localization, sensor fusion, SLAM, robust estimation, indoor positioning, deep learning

I. Introduction

Localization is the process of estimating the position and orientation of an object or agent within a known reference frame. It underpins many applications in autonomous robotics, vehicle navigation, wireless sensor networks, and augmented reality [1], [2], [7]. Autonomous systems must continuously localize to navigate safely, and in GPS-denied environments (e.g., indoors or urban canyons) alternative methods are required. Even outdoors, sole reliance on GNSS may be insufficient for safety-critical tasks demanding higher accuracy and reliability [1], [2].

Modern localization approaches can be broadly classified into geometry-based, sensor fusion (Bayesian filter-based), optimization-based (including SLAM), and learning-based methods [1], [5]. Geometry-based techniques (e.g., multilateration, triangulation) compute positions from reference anchors [6]. Sensor fusion treats localization as state estimation, combining predictions and noisy measurements in probabilistic frameworks such as Kalman or particle filters [3], [4]. Optimization and SLAM formulate localization as a graph or least-squares problem, solving for trajectories or maps that best explain sensor data [11], [12]. More recently, data-driven approaches with machine learning and deep neural networks aim to learn location directly from inputs or to enhance classical pipelines [9], [10].

Each class of methods has trade-offs in accuracy, computational cost, and robustness to uncertainties [1], [2]. In this paper we review the principal techniques, analyze their modeling aspects, and summarize performance in a comparative table, with emphasis on how they achieve accuracy and cope with noise, drift, and environmental changes [1], [5].

II. Methods and Analysis

A. Geometric Localization Techniques

Geometry-based localization relies on anchors and measured distances or angles. Trilateration and triangulation determine position from three or more reference points [6]. GNSS and UWB use time-of-flight ranging, often solved with least-squares. Under ideal conditions, UWB can achieve centimeter-level accuracy, while BLE fingerprinting in hospitals reached ~12 cm [2], [7]. However, these methods depend on line-of-sight and precise signals; multipath and NLOS significantly reduce robustness [2]. They also require fixed infrastructure, which may not always be available. Geometric methods thus are often combined with other techniques for reliability.

Dead-reckoning updates position by integrating odometry or IMU measurements. It is self-contained and precise short-term but suffers from drift as small errors accumulate. Hence it is typically fused with landmarks, GNSS, or wireless updates. Hybrid systems combining inertial sensors with Wi-Fi or UWB outperform standalone inertial navigation [3], [7].

B. Sensor Fusion and Bayesian Filters

Sensor fusion frames localization as a state estimation problem under uncertainty. The Bayesian filter family recursively updates a probability distribution of the state using motion models and observations. The most common example is the Kalman Filter (KF), which maintains a Gaussian estimate through prediction and correction. Under linear-Gaussian assumptions, KF is provably optimal [3]. Variants such as EKF and UKF extend it to non-linear dynamics and are widely used in GPS–inertial navigation and mobile robotics [3].

The strength of KF lies in multi-sensor fusion, where complementary modalities improve accuracy. Fusing

UWB ranges with odometry yields precise, stable trajectories and clearly outperforms UWB-only solutions [3], [4]. Anchors provide global reference, odometry smooths motion, and fusion corrects drift while filtering noise. Such systems remain efficient enough for embedded platforms [3], [4].

KF, however, assumes unimodal Gaussian errors and is sensitive to outliers [3]. Adaptive Kalman variants address this by adjusting covariances online [1]. For more general cases, Particle Filters (PF) represent the belief as a set of weighted samples, handling non-linear and multi-modal distributions [3]. PFs have been applied to indoor localization using Wi-Fi and landmarks, offering robustness to ambiguities like the "kidnapped robot" problem. Their drawback is computation: large particle sets are required to avoid degeneracy, especially in high-dimensional spaces [3]. Rao–Blackwellized and resampling strategies reduce this burden, making PFs highly robust but heavier than KF-based methods.

C. Optimization-Based Localization and SLAM

Optimization-based methods accumulate constraints over time and solve for the trajectory (and sometimes the map) that best fits all observations. Graph-Based SLAM is the prototypical example: robot poses are nodes, and sensor observations form edges. The problem is then solved as a least-squares optimization [11]. Modern sparse nonlinear solvers achieve high accuracy, especially by leveraging loop closures to eliminate accumulated drift. For instance, a robot driving a loop can redistribute error and align the start and end poses, producing a consistent trajectory [11].

Visual SLAM extends this idea with bundle adjustment, jointly optimizing camera poses and 3D landmarks, and achieving state-of-the-art accuracy in feature-based localization [11]. These methods naturally integrate long-term data and heterogeneous sensor constraints, while incremental smoothing (e.g., iSAM) enables near real-time operation [11].

A key challenge is robustness to incorrect loop closures, which can distort the solution. Robust cost functions, switchable constraints, and adaptive robust losses have been proposed to down-weight or reject outliers [4]. These approaches significantly improve resilience without heavy parameter tuning. Although large-scale graphs with thousands of nodes can be computationally demanding, sparsity and incremental solvers usually keep them tractable.

In summary, optimization-based localization offers high global accuracy and robustness when enhanced with proper outlier handling. In practice, these methods are often combined with local filters: the front-end tracks motion, while the back-end periodically optimizes constraints to correct drift [4], [11].

D. Learning-Based and Data-Driven Methods

Recent years have seen rapid growth in machine learning, especially deep learning, for localization. These approaches learn mappings from sensor inputs to positions instead of relying solely on physical models. In indoor contexts, fingerprinting with Wi-Fi RSSI or magnetic data is often combined with neural networks to improve accuracy [2], [7]. For visual localization, convolutional networks can directly regress camera pose (e.g., PoseNet) or support SLAM by extracting robust features [5], [8], [9], [10], [12].

The appeal of learning methods lies in capturing non-linear, high-dimensional patterns that classical models cannot. Deep visual networks, for instance, have achieved centimeter-level accuracy in controlled environments [5]. Hybrid IoT systems combining BLE beacons with ML have demonstrated decimeter-level tracking for healthcare and asset monitoring [7]. Once trained, such models can run efficiently, providing real-time estimates [5].

Challenges remain: deep models are data-hungry, environment-specific, and often fail to generalize across domains [5]. They also lack explicit uncertainty modeling and may be sensitive to adversarial conditions such as motion blur or missing signals [5]. This can make purely learned systems brittle.

A promising trend is hybridization-using deep learning within classical frameworks. Neural networks can predict observation reliability, correct sensor biases, or provide features such as LoFTR, SuperGlue, and NetVLAD that feed into geometric or graph-based back-ends [8], [9], [10], [12]. This leverages the adaptability of learning with the stability of model-based methods.

TABLE I. COMPARISON OF TOP LOCALIZATION METHODS

Method	*Principle*	*Pros*	*Cons*
Geometry	Distances/angles to anchors	Absolute position; simple; high accuracy in LOS	Needs infrastructure; poor in NLOS
Dead-Reckoning	Motion integration (IMU, odometry)	Self-contained; smooth short-term	Drift grows; not reliable long-term
Kalman Filter	Linear-Gaussian fusion	Efficient; real-time; widely used	Sensitive to model errors, outliers
Particle Filter	Sampling-based Bayes	Handles non-linear & multi-modal; robust	Computationally heavy
Graph-SLAM	Pose graph optimization	Global consistency; loop closure correction	Needs good associations; heavier compute
Deep Learning	Neural networks on sensor data	Learns complex patterns; fast inference	Data-hungry; poor generalization

III. RESULTS AND DISCUSSION

Each localization approach offers a different balance between accuracy, robustness, and practicality. In practice, designers often combine multiple methods to exploit complementary strengths. A common architecture is to use a Kalman or Particle Filter as the core state estimator, fed by odometry, IMU, and absolute inputs (GPS, UWB, vision). The filter enables real-time fusion, while a graph-based back-end periodically corrects drift through loop closures. Deep learning modules can enhance robustness by recognizing places or filtering unreliable measurements [4].

From the comparative analysis (Table 1), some clear trends emerge. Geometry-based multilateration provides strong accuracy when assumptions hold-GNSS outdoors or UWB indoors-but suffers indoors from multipath and NLOS [2], [7]. Such systems require infrastructure and

are fragile to environmental changes unless paired with error detection or down-weighting unreliable signals. Dead-reckoning alone is not sustainable due to drift, yet it is indispensable for continuity and redundancy, typically corrected with periodic external fixes [3], [7].

Bayesian filters (KF, EKF, UKF, PF) are highly effective for robust fusion. They smooth random noise and can detect faults in real time [3]. Adaptive filters adjust parameters on the fly, while PFs maintain multiple hypotheses, offering robustness in ambiguous environments at higher computational cost [3].

Graph-SLAM and optimization methods have become the standard in high-precision mapping, eliminating drift through loop closures and global optimization [11]. Robust formulations-switchable constraints, robust kernels, consensus methods-mitigate false associations [4]. These systems often complement filters: the front-end tracks locally, while the back-end refines trajectories at a slower rate.

Learning-based approaches are increasingly impactful, particularly for visual re-localization and indoor fingerprinting. Neural networks outperform classical interpolation for Wi-Fi or BLE signals [2], [7], and deep visual models achieve viewpoint- and lighting-invariant recognition [5], [8], [9], [10], [12]. However, they remain limited by data requirements and generalization challenges. Research into domain randomization and uncertainty-aware deep networks seeks to improve robustness [5].

Overall, achieving both accuracy and robustness requires hybridization. Systems that combine multiple modalities-geometry for absolute scale, dead-reckoning for continuity, Bayesian filters for fusion, optimization for global consistency, and deep learning for perception-consistently show the highest resilience [1], [3], [10]. Table 1 summarizes these trade-offs and can guide method selection depending on computational resources, environment, and safety requirements.

IV. Conclusion

Reliable localization is inherently multi-faceted and requires combining methods. Geometric approaches provide absolute positioning but degrade under multipath or NLOS conditions [2]. Probabilistic filters such as Kalman and Particle Filters enable real-time fusion and noise handling, forming the backbone of many robust systems [3]. Graph-based optimization and SLAM refine accuracy over time through loop closures and global consistency [4], [11]. Deep learning adds adaptability by capturing complex patterns, though it remains data-hungry and environment-specific [5].

Comparative analysis highlights a clear trend: hybrid frameworks achieve the best outcomes by integrating multiple modalities and employing robust modeling [1], [3]. For example, autonomous vehicles fuse GNSS, lidar-SLAM, vision, and IMU to achieve centimeter-level accuracy, while indoor robotics may combine vision-SLAM with UWB anchors for global reference. Recent work also emphasizes uncertainty quantification and fault detection as key for trustworthy localization [1].

In practice, no single method is universally optimal-the choice depends on application context and accuracy requirements. The most promising direction is tighter integration of learning with model-based approaches, leading to systems that are both precise and resilient in diverse conditions [5]. Such advances will be critical as autonomous platforms scale into complex real-world environments.

References

[1] Maharmeh, E., Al-Dubai, A., & Romdhani, I. A Comprehensive Survey on the Integrity of Localization Systems. Sensors, Vol. 25, No. 2, Article 358, 2025, pp. 1–20. DOI: 10.3390/s25020358.

[2] Aziz, T., & Koo, I. A Comprehensive Review of Indoor Localization Techniques and Applications in Various Sectors. Applied Sciences, Vol. 15, No. 3, Article 1544, 2025, pp. 1–23. DOI: 10.3390/app15031544.

[3] Shyfur, B., et al. Multi-Sensor Fusion for Reliable Mobile Robot Localization (UWB, Odometry, AHRS). Biomimetics, Vol. 10, No. 4, Article 478, 2025, pp. 1–15. DOI: 10.3390/biomimetics10040478.

[4] Ramezani, M., et al. AEROS: Adaptive Robust Least-Squares for Graph-Based SLAM. arXiv preprint arXiv:2110.02018 [cs.RO], 2021.

[5] Chen, C., Wang, B., Lu, C., Trigoni, N., & Markham, A. Deep Learning for Visual Localization and Mapping: A Survey. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, Preprint, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2308.14039.

[6] Shyfur, B., et al. Trilateration Defined and Formulated in a UWB System. Biomimetics, Vol. 10, No. 4, 2025, pp. 900–935.

[7] Bibbò, L., et al. An Overview of Indoor Localization for Human Activity Recognition (HAR) in Healthcare. Sensors, Vol. 22, No. 21, Article 8119, 2022, pp. 1–18. DOI: 10.3390/s22218119.

[8] Sarlin, P.-E., DeTone, D., Malisiewicz, T., & Rabinovich, A. SuperGlue: Learning Feature Matching with Graph Neural Networks. In Proc. CVPR, 2020, pp. 4938–4947.

[9] Sun, J., Shen, Z., Wang, Y., Bao, H., & Zhou, X. LoFTR: Detector-Free Local Feature Matching with Transformers. In Proc. CVPR, 2021, pp. 8922–8931.

[10] Arandjelović, R., Gronat, P., Torii, A., Pajdla, T., & Sivic, J. NetVLAD: CNN Architecture for Weakly Supervised Place Recognition. In Proc. CVPR, 2016, pp. 5297–5307.

[11] Sarlin, P.-E., Cadena, C., Siegwart, R., & Dymczyk, M. From Coarse to Fine: Robust Hierarchical Localization at Large Scale. In Proc. CVPR, 2019, pp. 12708–12717.

[12] Brachmann, E., & Rother, C. DSAC++: Differentiable RANSAC for Camera Localization. In Proc. CVPR, 2019, pp. 6689–66

Comparative Analysis of Pressure Reconstruction Methods from Simulation Impulse Data

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.068

Vladyslav Kochkarov
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
v.d.kochkarov@nuwm.edu.ua

Petro Martyniuk
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
p.m.martyniuk@nuwm.edu.ua

Abstract— **This thesis investigates the ill-posed problem of reconstructing the pressure time profile p(t) on a structure from discrete impulse data obtained in a 2D Discrete Element Method (DEM) simulation of blast loading. A systematic comparative analysis of six reconstruction methods is carried out: interval averaging, trapezoidal rule inversion, direct differentiation of cumulative impulse, cubic spline approximation, Savitzky-Golay filtering, and Tikhonov regularization with a non-negativity constraint. To assess the quality and physical adequacy of the solutions, a comprehensive system of metrics was developed, including smoothness, integral conservation (energy balance), and the fraction of non-physical negative values. For comparison with experimental data, a robust procedure is proposed that includes automatic time scale calibration and scale-independent signal shape validation. All results presented in the article are generated automatically within a single computational pipeline. The analysis shows that direct differentiation methods are critically unstable, while the Tikhonov regularization method with automatic parameter selection via Generalized Cross-Validation demonstrates the best trade-off between stability, smoothness, and fidelity to the source data.**

Keywords—pressure reconstruction, inverse problem, impulse, DEM, Tikhonov regularization, Savitzky-Golay filter, cubic splines

I. Introduction

The assessment of dynamic loads from shock waves on infrastructure elements is a critical task for ensuring their safety and stability. In many cases, both in physical experiments and computer simulations, direct measurement of pressure is difficult. Instead, the integral characteristic: impulse is easier to measure, by recording particle collisions with an obstacle in the simulation.

This work focuses on the inverse problem: restoring the time dependence of pressure $p(t)$ from a known time series of impulse increments $\Delta I(t)$, obtained from a 2D DEM (Discrete Element Method) simulation. From a mathematical point of view, this problem is ill-posed, as it requires differentiating noisy data, which is an unstable operation. Therefore, to obtain a physically adequate solution, it is necessary to apply regularization methods and consider a priori constraints, particularly the non-negativity of pressure $p(t) \geq 0$.

II. DEM Simulation and Impulse Measurement

The data for the analysis is generated in a 2D DEM simulation, which models the movement of "air" particles colliding with a stationary modular structure [1]. A key aspect of the simulation is the use of a deterministic time axis based on the number of steps the physical engine processed during the simulation, which ensures full reproducibility of the results.

For each particle contact with the structure, the time of collision, mass, and velocity of the particle are recorded. The impulse of a single event is calculated as

$$\Delta I_{event} = |v| \cdot m.$$

III. Computational Pipeline

The data processing and pressure reconstruction are executed through an automated pipeline. This procedure commences with a preprocessing stage, wherein collision events are temporally sorted and aggregated within discrete time steps, enabling the calculation of precise time intervals (Δt). To address methods susceptible to outliers, a robust winsorization procedure is applied to the impulse data at the 1st and 99th percentiles, which mitigates the influence of extreme values without compromising the overall integral. Following preprocessing, time scale alignment is performed by automatically scaling the simulation's time axis to ensure accurate comparison with experimental data. The scaling factor is calibrated to match the full width at half maximum (FWHM) of a preliminary reconstruction with its experimental counterpart. Subsequently, pressure reconstruction is conducted using the six methodologies (M1-M6) detailed in Section 4, with careful consideration of non-uniform time steps (Δt). Reconstruction Methods (M1–M6)

Let us denote the discrete time intervals as Δt_k, the corresponding impulse increments as ΔI_k, and the cumulative impulse as $I_{cum}(t)$.

The initial methodology, Interval Averaging (M1), calculates pressure through the fundamental relation $p_k = \frac{\Delta I_k}{\Delta t_k}$. While this elemental method ensures integral conservation [2], it yields a piecewise-constant, non-smooth profile, thereby serving as a stable baseline for comparative analysis.

The second methodology, Trapezoidal Rule Inversion (M2), is based on the recursive formula $p_k = \frac{2 \cdot \Delta I_k}{\Delta t_k} - p_{k-1}$[3], initialized with $p_0 = 0$. In theory, this method should generate a linear pressure profile; however, in practice, it exhibits critical instability due to error propagation, which results in non-physical oscillations.

The third methodology, Differentiation of Cumulative Impulse (M3)[4], approximates pressure using the central difference formula:

$$p(t_k) \approx \frac{I_{k+1} - I_{k-1}}{t_{k+1} - t_{k-1}}.$$

This constitutes a direct numerical implementation of the definition of pressure as the impulse derivative. While it circumvents the recursive instability of M2, it is highly susceptible to the amplification of noise present in the source data.

The fourth methodology, Cubic Splines (M4)[5], involves approximating the cumulative impulse function $I_{cum}(t)$ with a smooth cubic spline, $S(t)$, followed by analytical differentiation to obtain the pressure profile: $p(t) = S'(t)$. This technique yields a continuously differentiable profile but may introduce numerical artifacts, such as oscillations and negative "tails," particularly at the interval boundaries.

The fifth methodology, the Savitzky-Golay Filter (M5), performs local polynomial smoothing on the cumulative impulse I_{cum} within a moving window [6], concurrently computing its derivative. The optimal parameters—a window size of 21 and a polynomial order of 2—were determined via a grid search methodology. This parameter set was selected for its efficacy in minimizing the trade-off between smoothness and the impulse balance error. This filter represents an effective technique for simultaneous smoothing and differentiation.

The final methodology, Tikhonov Regularization (M6) [7], is formulated as the solution to a system of linear equations $Ap = b$, where A is the integration operator matrix. The system is regularized to obtain a smooth and stable solution by minimizing the functional

$$|Ap - b|_2^2 + \lambda^2 |Dp|_2^2,$$

where D is the second-difference matrix (a "non-smoothness" operator), and λ is the regularization parameter.

IV. Conclusion

The data unequivocally demonstrates the critical instability of method M2, which is manifested in enormous roughness, a large fraction of negative values, and a catastrophic balance error. Method M3 is also unstable. Methods using smoothing (M4, M5, M6) show significantly better results. M5 provides the highest smoothness but has a small balance error and a fraction of negative values. Method M6 with GCV regularization and projection guarantees complete non-negativity with acceptable smoothness and a relatively small balance error, making it the most balanced.

V. References

[1] Martynyuk, P. M., & Kochkarov, V. D. (2024). Simulation modeling of free explosion wave parameters in two-dimensional space. NUWGP. Series "Technical Sciences", Issue 4(108). UDC 519.87:631.41. https://doi.org/10.31713/vt4202417

[2] Bruno, L., & Erb, W. (2023). Polynomial Interpolation of Function Averages on Interval Segments. SIAM J. Numer. Anal., 62, 1759-1781. https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.00328

[3] Trefethen, L., & Weideman, J. (2014). The Exponentially Convergent Trapezoidal Rule. SIAM Rev., 56, 385-458. https://doi.org/10.1137/130932132

[4] Van Breugel, F., Kutz, J., & Brunton, B. (2020). Numerical Differentiation of Noisy Data: A Unifying Multi-Objective Optimization Framework. IEEE Access, 8, 196865-196877. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3034077

[5] Eddargani, S., Oraiche, M., Lamnii, A., & Louzar, M. (2022). C2 Cubic Algebraic Hyperbolic Spline Interpolating Scheme by Means of Integral Values. Mathematics, *10*(9), 1490. https://doi.org/10.3390/math10091490

[6] Sadeghi, M., Behnia, F., & Amiri, R. (2020). Window Selection of the Savitzky–Golay Filters for Signal Recovery From Noisy Measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 69, 5418-5427. https://doi.org/10.1109/TIM.2020.2966310

[7] Ji, K., Shen, Y., Chen, Q., Li, B., & Wang, W. (2022). An Adaptive Regularized Solution to Inverse Ill-Posed Models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60, 1-15. https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3205572

MCIT Modeling, control & information technologies

Mass Transfer Problem with Saturation Limit on Graph

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.069

Valerii Kolesnykov
Department of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
valerii.kolesnykov@knu.ua

Dmytriy Klyushin
Department of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
dmytro.klyushin@knu.ua

Abstract—**This paper contains main results of the research of mass transfer problem in porous medium with saturation limit on graphs. The equation that describes this problem is based on the one-dimensional Richards-Klute equation with additional mass balance equations. Among the results are existence theorem, stability result and effective numerical method for solving equation.**

Keywords—mathematical modeling; Richards-Klute equation; numerical methods; graphs.

I. Introduction (Heading 1)

Mass transfer process in porous medium with saturation limit is one of the most important processes which appear in the fields of agriculture and man-made disaster modeling. It is usually described by one-, two- or three-dimensional Richards-Klute equation [1,2]. For modeling of the mass transfer process in the system of pipes it is also possible to obtain the Richards-Klute equation on graph [3]. All of these equations are quasilinear elliptic-parabolic partial differential equations. Because of this, main instrument to solve these equations are numerical methods. They can be based on finite element method, finite volume method and finite difference method. They can also be modified using implicit/explicit time schemes and different forms of the Richards-Klute equation [4, 5].

Due to the properties of the equation, numerical methods for finding approximate solution require a large number of calculations, main part of which are calculations required to solve linear systems on each time step. Fast and accurate numerical method designed for specific type of the Richards-Klute equation is one of the most important tools for obtaining a more efficient way to model the mass transfer process.

II. Richards-Klute Equation on Graph

Let's consider graph $G = (V,E)$ embedded in three-dimensional space. The edges $e \in E$ of this graph can be interpreted as the pipes in the irrigation system, and the vertices $v \in V$ are the connections of these pipes. Then let's consider the Richards-Klute equation on graph G [3]. This equation is based on the one-dimensional Richards-Klute equation on each edge, continuity conditions of solution in vertices and mass balance equations in vertices.

$$C_e \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(K_e \left(\frac{\partial h}{\partial x} + g_z \right) \right), x \in [0, L_e], \quad (1)$$

$$h(v) = h(\delta_e), e \in Inc(v), \quad (2)$$

$$\sum_{e \in Inc(v)} q_e(\delta_e) = 0. \quad (3)$$

Here t is time [s], h is a pressure head [m] (unknown), C_e and K_e are the characteristics of the porous medium in the pipe e, g_z is the gravity impact and its value depends on the direction of the pipe in the gravity field, L_e is length of the pipe, $\delta_e = 0$ or L_e depending on which end of e is incident to v, $Inc(v)$ is a set of edges which are incident to vertex v, q_e is a positive flux through the boundary δ_e of the edge e.

For modeling the mass transfer process on the graph, we also must add initial condition on pressure head on all edges and boundary conditions of first or second kind on some of the vertices. By doing this, we obtain a system of equation which is called Richards-Klute equation on graph.

Equations (1)-(3) can be easily transformed to system of linear algebraic equations for numerical methods. Equations on edges (1) can be discretized in the same way as one-dimensional Richards-Klute equation. Continuity conditions (2) simply transform into equations between nodes of different adjacent edges. Mass balance equation (3) for every vertex v can be discretized in the following way.

$$\sum_{i=1}^{m_N} \frac{1}{\Delta x_i} K_i^{N_i - \frac{1}{2}} \left(\frac{h_{i,N_i-1}^{j+1} - h_v^{j+1}}{\Delta x_i} + g_{i,z} \right) - \sum_{i=1}^{m_0} \frac{1}{\Delta x_i} K_i^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h_{i,1}^{j+1} - h_v^{j+1}}{\Delta x_i} + g_{i,z} \right) = 0, \quad (4)$$

where m_0 is number of edges incident to v, for which $\delta_e = 0$, m_N is number of edges incident to v, for which $\delta_e = L_e$, j is current and $j+1$ is the next time step, Δx_i is the spatial step, $g_{i,z}$ and K_i are calculated at the corresponding point of edge e_i.

III. Existence and Stability Results

There is classic result of existence of the weak solution of one-, two- and three-dimensional Richards-Klute equations presented in [6]. It is based on some conditions on properties of porous media and initial and boundary functions. These conditions can be modified for Richards-Klute equation on graph [7]. Using these modified conditions, one can prove the next result.

Theorem 1. Under the conditions listed in [7] there is a weak solution of Richards-Klute equation on graph.

To obtain stability result, we need to add one more condition.

$$\left|K(h_1) - K(h_2)\right| \le c\left|h_1 - h_2\right|, \tag{5}$$

where c is constant. Then we can prove the stability result.

Theorem 2 [7]. Let H_1 and H_2 are solutions of Richards-Klute equation on graph at time T with initial conditions h_1 and h_2 respectively. And let $\theta(h)$ is a function between pressure head and saturation level ($\partial\theta/\partial h = C(h)$). Then

$$\sum_{e\in E}\int_e \left|\theta(H_1) - \theta_2(H_2)\right| de \le \sum_{e\in E}\int_e \left|\theta(h_1) - \theta(h_2)\right| de. \tag{6}$$

IV. Numerical Method

Using (4) and standard discretization methods for equations (1)-(2) we can transform the Richards-Klute equation on graph to the system of linear algebraic equations. Thus, modeling process is just solving obtained system for every time step.

Matrix of the obtained system on fixed time step has the following properties:

- it is sparse;
- it is symmetric;
- it is diagonally dominant.

These properties allow us to use fast numerical methods for sparse matrices to solve linear system (like Seidel method or conjugate gradient method). But if graph is a simple path, the Richards-Klute equation on graph can be transformed into the one-dimensional Richards-Klute equation and then the direct Thomas method can be used. At the same time, if graph is a simple cycle, then modified Thomas method [8] can be used. Based on original and modified Thomas methods one can build direct numerical method for solving Richards-Klute equation on graph [9].

Let's consider graph G' which represents nodes of the discretization of the graph G and which is related to linear system in the following way.

$$a_{ij} \ne 0 \Leftrightarrow i \in Adj(j), \tag{3}$$

where $Adj(j)$ is a set of nodes that are adjacent to node j in graph G'. Then the modified Thomas method for graphs is just repeating following 3 steps:

- find the longest simple path (cycle) in G';
- solve linear subsystem for found path (cycle) using original (modified for cycles) Thomas method considering all matrix coefficients which connect nodes from found path (cycle) and other nodes of G';
- exclude nodes of found path (cycle) from graph G' and exclude corresponding linear equations from system.

As long as one makes these three steps the linear system size gets smaller, so we can say that after finite number of steps, which depends only on properties of graph G, one can transform original system to small system, size of which also depends only on properties of graph G, but not on the spatial discretization parameters or number of vertices of graph G'. This method is also direct and stable, because it is based on direct and stable original and modified for cycles Thomas methods.

V. Conclusions

A mass transfer process in porous media with saturation limit is described using Richards-Klute equation. Using additional mass balance equations the Richards-Klute equation on graph is obtained. Existence and stability result are given. A direct stable numerical method for solving linear systems for finding approximate solution of the Richards-Klute equation on graph was built.

References

[1] L. F. Richardson, "Weather prediction by numerical process," University Press, Cambridge, p. 262, 1922. https://doi.org/10.1002/qj.49704820311

[2] L. Richards, "Capillary conduction of liquids through porous mediums," Physics, vol. 1(5), pp. 318–333, 1931. https://doi.org/10.1063/1.1745010

[3] V. Kolesnykov, "Richards-Klute equation on graphs," Modeling, control and information technologies: Proceedings of VI International scientific and practical conference, (6), pp. 70-72, 2023. https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.018

[4] M. W. Farthing, F. L. Ogden, "Numerical solution of Richards' equation: a review of advances and challenges," Soil Science Society of America Journal, vol. 81:6, pp. 1257–1269, 2017. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.02.0058.

[5] Y. Zha, J. Yang, J. Zeng, C.-H. M. Tso, W. Zeng, L. Shi, "Review of numerical solution of Richardson-Richards equation for variably saturated flow in soils," WIREs Water, vol. 6:5, 2019.https://doi.org/10.1002/wat2.1364

[6] H. W. Alt, S. Luckhaus, "Quasilinear elliptic-parabolic differential equations," Math.Z., vol. 183, no. 1, pp. 311–341, 1983.

[7] V. A. Kolesnykov, "Development of a software complex for modeling mass transfer process in porous media," PhD Dissertation, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 137 p, 2024.

[8] A.A. Abramov, V. B. Andreev, "On the application of the sweep method to finding periodic solutions of differential and difference equations," Journal of numerical mathematics and mathematical physics, vol. 3(2), pp. 377–381, 1963.

[9] D. A. Klyushin, V. A. Kolesnykov, S. I. Lyashko, "Mass transfer problem with saturation limit and flow restrictions in graph structured porous media," Cybernetics and System Analysis, vol. 61(6), 2025. (in press)

On the Solution of a Linear Fuzzy Cauchy Problem with Constant Coefficients

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.070

Tatyana Komleva
Department of Mathematics
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
Odessa, Ukraine
t-komleva@ukr.net

Abstract— **In this report we consider a linear fuzzy Cauchy problem with constant coefficients and present an analytical formula for its solution.**

Keywords—fuzzy; Cauchy problem; Hukuhara derivative; linear

I. Introduction

The theory of fuzzy sets, introduced by L.A. Zadeh [1], allows us to model non-probabilistic uncertainties with ease. This fact explains the growing interest in both the theoretical and practical aspects of fuzzy set theory in recent years. Applications of fuzzy set theory can be found in many fields of science, including the physical, mathematical, and engineering sciences [2–9]. More recently, significant progress has been made in the theory of fuzzy differential equations, differential inclusions with fuzzy right-hand sides, and fuzzy differential inclusions, as well as in the theory of controlled fuzzy differential equations and controlled fuzzy differential inclusions (see [5–14] and the references therein).

The report examines a linear fuzzy differential equation with constant coefficients and provides an analytical formula for its solution.

II. Preliminaries

Let R be the set of real numbers and R^n be the n-dimensional Euclidean space ($n \geq 2$). Denote by $conv(R^n)$ the set of nonempty compact and convex subsets of R^n.

For two given sets $X, Y \in conv(R^n)$ and $\lambda \in R$, the Minkowski sum and scalar multiple are defined by $X+Y=\{x+y \mid x \in X, y \in Y\}$ and $\lambda X=\{\lambda x \mid x \in X\}$.

Also, let's add one more operation: the product of a matrix with a set $AX=\bigcup_{x \in X} Ax$, where $A \in R^{n \times n}$ is real matrix of size $n \times n$ and $X \in conv\left(R^n\right)$.

Consider the Pompeiu-Hausdorff distance $h(\cdot,\cdot)$ given by

$$h(X,Y)=\min\left\{r \geq 0 \mid X \subset Y+B_r(0),\ Y \subset X+B_r(0)\right\},$$

where $B_r(0)=\left\{x \in R^n \mid \|x\| \leq r\right\}$ is the closed ball with radius r centered at the origin ($\|x\|$ denotes the Euclidean norm).

It is known that $(conv(R^n), h)$ is a complete metric space [7].

Let E^n be a family of all $u: R^n \to [0,1]$ such that u satisfies the following conditions:

1) u is normal, i.e. there exists $x_0 \in R^n$ such that $u(x_0)=1$;
2) u is fuzzy convex, i.e. for any $x, y \in R^n$ and $0 \leq \lambda \leq 1$ $u\left(\lambda x+(1-\lambda) y\right) \geq \min\left\{u(x), u(y)\right\}$;
3) u is upper semicontinuous, i.e. for any $x_0 \in R^n$ and $\varepsilon>0$ there exists $\delta(x_0,\varepsilon)>0$ such that $u(x)<u(x_0)+\varepsilon$ whenever $\|x-x_0\|<\delta(x_0,\varepsilon)$, $x \in R^n$;
4) the closure of the set $\left\{x \in R^n : u(x)>0\right\}$ is compact.

If $u \in E^n$, then u is called a fuzzy set, and E^n is said to be a space of fuzzy sets.

Definition 1.[4] The set $\left\{x \in R^n : u(x) \geq \alpha\right\}$ is called the α *-level* $[u]^\alpha$ of a fuzzy set $u \in E^n$ for $0<\alpha \leq 1$. The closure of the set $\left\{x \in R^n : u(x)>0\right\}$ is called the 0 -level $[u]^0$ of a fuzzy set $u \in E^n$.

Theorem 1. [5] (Stacking Theorem). If $u \in E^n$ then
1) $[u]^\alpha \in conv(R^n)$ for all $\alpha \in [0,1]$;
2) $[u]^{\alpha_2} \subset [u]^{\alpha_1}$ for all $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq 1$;
3) if $\{\alpha_k\}$ is a nondecreasing sequence converging to $\alpha>0$, then $[u]^\alpha=\bigcap_{k \geq 1}[u]^{\alpha_k}$.

Conversely, if $\left\{X_\alpha : \alpha \in [0,1]\right\}$ is the family of subsets of R^n satisfying conditions 1) - 3) then there exists $u \in E^n$ such that $[u]^\alpha=X_\alpha$ for $0<\alpha \leq 1$ and $[u]^0=\overline{\bigcup_{0<\alpha \leq 1} X_\alpha} \subset X_0$.

We define $u+v$ and Au by $[u+v]^{\alpha}=[u]^{\alpha}+[v]^{\alpha}$ and $[Au]^{\alpha}=A[u]^{\alpha}$ respectively, for every $\alpha\in[0,1]$ and $A\in R^{n\times n}$

Define $D: E^n\times E^n\to[0,\infty)$ by the relation

$$D(u,v)=\sup_{0\le\alpha\le1} h\left([u]^{\alpha},[v]^{\alpha}\right).$$

Then D is a metric in E^n. Further we know that [5,7]:

i) $\left(E^n,D\right)$ is a complete metric space,

ii) $D(u+w,v+w)=D(u,v)$ for all $u,v,w\in E^n$,

iii) $D(\lambda u,\lambda v)=|\lambda|D(u,v)$ for all $u,v\in E^n$ and $\lambda\in R$.

Let X,Y,Z be in $conv(R^n)$. The set Z is the Hukuhara difference of X and Y, if $Y+Z=X$, i.e. $Z=X\overset{H}{-}Y$.

Definition 2.[5,7] A mapping $F:[0,T]\to conv(R^n)$ is differentiable in the sense of Hukuhara at $t\in[0,T]$ if for some $h>0$ the Hukuhara differences $F(t+\Delta)\overset{H}{-}F(t)$, $F(t)\overset{H}{-}F(t-\Delta)$ exist in $conv(R^n)$ for all $0<\Delta<h$ and there exists $D_HF(t)\in conv(R^n)$ such that

$$\lim_{\Delta t\to0} h\left(\Delta^{-1}(F(t+\Delta)\overset{H}{-}F(t)),D_HF(t)\right)=0$$

and

$$\lim_{\Delta t\to0} h\left(\Delta^{-1}(F(t)\overset{H}{-}F(t-\Delta)),D_HF(t)\right)=0.$$

Here $D_HF(t)$ is called the Hukuhara derivative of $F(\cdot)$ at t.

Definition 3.[5,7] A mapping $x:[0,T]\to E^n$ is called differentiable at $t\in[0,T]$ if for any $\alpha\in[0,1]$ the set-valued mapping $x_{\alpha}(t)=[x(t)]^{\alpha}$ is differentiable in the sense of Hukuhara at point t with $D_Hx_{\alpha}(t)$ and the family $\{D_Hx_{\alpha}(t):\alpha\in[0,1]\}$ defines a fuzzy set $D_Hx(t)\in E^n$.

If $x:[0,T]\to E^n$ is differentiable at $t\in[0,T]$, then we say that $D_Hx(t)$ is the fuzzy derivative of $x(\cdot)$ at the point $t\in[0,T]$.

III. Linear Fuzzy Problem

Now, consider the Cauchy problem

$$D_Hx(t)=Ax(t)+f,\quad x(0)=x_0,\qquad(1)$$

where $A\in R^{n\times n}$, $x_0,f\in E^n$.

The fuzzy mapping $x(\cdot)$ will be called the solution of the system (1) on the interval $[0,T]$ if it is continuously and satisfies system (1) on $[0,T]$.

Theorem 2. If the matrix A is non-degenerate, then system (1) has a unique solution of the form

$$x(t)=x_0+\sum_{k=1}^{\infty}\left[\frac{A^kt^k}{k!}\left(x_0+A^{-1}f\right)\right]$$

for all $t\in[0,T]$.

Remark. If the singular values of the matrix A are such that $\sigma_1=...=\sigma_n=\sigma$ and $Ax_0=\sigma x_0$, then

$$x(t)=e^{\sigma t}x_0+\sum_{k=1}^{\infty}\left[\frac{A^kt^k}{k!}A^{-1}f\right].$$

Remark. If also $Af=\sigma f$, then

$$x(t)=e^{\sigma t}x_0+\frac{1}{\sigma}\left(e^{\sigma t}f-f\right)$$

where $[g-f]^{\alpha}=[g]^{\alpha}\overset{H}{-}[f]^{\alpha}$ for all $\alpha\in[0,1]$.

References

[1] L.A. Zadeh, “Fuzzy sets,” Inf. Control, no. 8, 1965, pp. 338-353.

[2] Gy. Bárdossy, J. Fodor, “Evaluation of uncertainties and risks in geology,” Springer Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 2004

[3] H.-J. Zimmermann, “Fuzzy set theory and its applications,” Springer Science + Business Media New York, 2001.

[4] D. Dubois and H. Prade, “Fuzzy sets and systems,” Academic Press, New York, 1980

[5] V. Lakshmikantham, and R.N. Mohapatra, “Theory of fuzzy differential equations and inclusions,” Series in Mathematical Analysis and Applications, vol. 6. Taylor & Francis, Ltd., London, 2003.

[6] S. Chakraverty, S. Tapaswini, and D. Behera, “Fuzzy Differential Equations and Applications for Engineers and Scientists,” CRC Press, 2017.

[7] A.V. Plotnikov and N.V. Skripnik, “Differential equations with "clear" and fuzzy multivalued right-hand side. Asymptotics methods,” AstroPrint, Odessa, 2009.

[8] B. Bede, “Mathematics of fuzzy sets and fuzzy logic,” Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 295, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2013.

[9] B. Pękala, “Uncertainty data in interval-valued fuzzy set theory,” Properties, Algorithms and Applications, Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 367, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2019.

[10] O. Kaleva, “Fuzzy differential equations,” Fuzzy Sets Syst., vol. 24, no. 3, 1987, pp. 301-317.

[11] J.-P. Aubin, “Fuzzy differential inclusions,” Probl. Control Inf. Theory, vol. 19, no. 1, 1990, pp. 55-67.

[12] V.A. Baidosov, “Fuzzy differential inclusions,” J. Appl. Math. Mech., vol. 54, no. 1, 1990, pp. 8-13.

[13] T.E. Dabbous, “Adaptive control of nonlinear systems using fuzzy systems,” J. Ind. Manag. Optim., vol. 6, no. 4, 2010, pp. 861-880.

[14] E. Hullermeier, “An approach to modelling and simulation of uncertain dynamical systems,” Internat. J. Uncertain., Fuzziness Knowledge-Based Systems, no. 7, 1997, pp. 117–137.

MCIT Modeling, control & information technologies

The Image Processor based on Signal Ranking, Determination of Rank Differences with their subsequent Selection and Weighted Addition

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.071

Krasilenko Vladimir
Vinnytsia National Agrarian University
VNAU
Vinnytsia, Ukraine
krasvg@i.ua

Nikitovich Diana
Vinnytsia National Technical University
VNTU
Vinnytsia, Ukraine
diananikitovych@gmail.com

Lazarev Alexander
Vinnytsia National Technical University
VNTU
Vinnytsia, Ukraine
krasvg@i.ua

Abstract— **In order to expand the functionality by increasing the number and complexity of nonlinear multi-input functions and transformations performed, in this paper we consider the urgent need for creating high-performance hardware image processors (IP). Such IPs are designed based on a conceptual approach, the essence of which is to rank the processed signals (pixels), fast command-controlled selection of rank differences with their subsequent weight addition. And since these procedures are basic for all advanced models of convolutional neural networks (CNNs), such IP can play the role of not only high-speed pre-filtering devices, but also be self-learning reconfigurable accelerators for CNNs, associative memory models, clustering and pattern recognition. First, we briefly review related works in order to show the advantages of using the proposed concept and equivalence models (EMs). The capacity and recognition properties of NNs based on modified EMs exceed the similar indicators of traditional networks by orders of magnitude. Therefore, such EM-neuroparadigm is promising for processing, recognition of large-sized images, including highly correlated, high-noise images. And since the main nodes of EMs are filtering nodes and procedures with continuous-logical operations, in this article we consider approaches to the design of IPs with extended functionality. The proposed structure of the processor based on our concept and the FPGA Altera EP3C16F484 Cyclone III family chip. The design results and calculations show that it is possible to implement IP for an image size of 64*64 and a window of 3*3 in a single crystal. For 2.5 V and a clock frequency of 200MHz, the power consumption will be at the level of 200mW, and the time for calculating the filter pixels will be 25ns. The results confirm the correctness of the concept.**

Keywords—image processor, signal ranking, selection, weighted addition; equivalental model, rank differences, neuron-equivalentor, convolutional neural network.

I. Introduction, Overviev, Analysis of Publications and Formulation of Work Goal

Advanced direction becomes fast parallel images processing using optoelectronics for interconnects and non-conventional MIMO-system, corresponding matrix logics (ML) (continuous, neural-fuzzy and others) and corresponding mathematical apparatus [1-5]. Photodetectors can be monolithically integrated with digital electronics in silicon, which allows the realization of stacked 3-D chip architecture in principle and significantly simplifies design of OE-VLSI circuits [2]. Smart image sensors with ADC [4, 5] show a great application field and potential. Our approach favors smart pixel architecture combining parallel signal detection with parallel processing in circuit, what guarantees the fastest processing. For self-learning neural networks (NN) based on equivalency models (EM) [6, 7], the elements of MLs are required. For the description and modeling of each continual subject domain and the class of its tasks, its own logical-algebraic apparatus (LAA) is required. Formal LAA is based on clear rules that allow you to make an exact description of a certain class of problems and even suggest an algorithm for solving them. The basis of information technologies in the analog field is precisely the continual LAAs: infinite-valued logic [8], continuous logic with all its variants and generalizations, additive-multiplicative logic (AM) algebra, predicate selection algebra, equivalence algebra [6-7]. They determined the biologically inspired stage of development of LAAs and new more energy-efficient direction of models and hardware implementations of artificial intelligence. Many logics are based on multi-input operations ***min*** ($x_1, x_2, \dots x_n$) and ***max*** ($x_1, x_2, \dots x_n$). The image processing algorithms, basic procedures of composition-decomposition, fuzzy inference in artificial neural-fuzzy systems are also based on multi-input min-max operations. Therefore, is an urgent need

to improve the nodes, that perform these and similar operations. Efficiency increasing of systems of speed images processing in the use of special mathematical support. The special place among such methods occupies the class of the nonlinear algorithms that carried out transformation of kind: $\mathbf{B}=\{b_{k,l}\}=\mathbf{F}(\mathbf{A})=\{\mathbf{\Phi}_{k,l}(\mathbf{A}_{k,l})\}$, where $\mathbf{\Phi}_{k,l}(\mathbf{A}_{k,l})$ — nonlinear function, which is determined by subset of rank and (or) index statistician of selection. By virtue of the last this subclass was adopted by rank algorithms.

The algorithms of extreme filtration, using values of ***min*** and ***max*** on samples of neighborhood space, are the special cases of the rank algorithms. Any r-th index statisticians $v_s(\mathbf{r})$ of display (k, l) the set neighboring of which form other $(N_s\text{-}1)$ the elements of selection it is possible to bind to the local histograms of distributing of values of neighboring elements and with the proper functions of the well-organized choice $F_n^m(\boldsymbol{X})$ element, where $\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, \dots x_n)$. Such functions at any values of changing variables choose that size which at the location all right not decreasing are occupied by m-th place. These functions can be represented by a logical formula: $F^{(r)}(x_1, x_2, \dots x_n) = x^{(r)}$, $r=1\div n$, where r-rank of the base operations of continuous logic (CL). Thus for r = n this operation passes to n-local disjunction, for r=1 to n-local conjunction. The algebra formed in a number of C = [0, 1] with base operations f(r) and complementarity operation (-) is named ordering Boolean algebra. Rank algorithms are locally-adaptive on the same essence: simplicity of local adaptation, invariance to spatial links and to signals dimension, almost algorithms complication independence from the sizes of neighboring. Sorting algorithms have been widely researched due to the need for sorting in many applications. In paper [9] approaches to creation of programmable relational processors for sorting were shown. But in such a relational processor, working with analog signals, the sorting structure for ordering signals is complex.

Therefore, the aim is to simplify and digitize the sorting node to build on its basis the relational processors of nonlinear image processing. The latter can be used as nodes of ordinal logic, data ordering and sorting nodes, rank filters, fragment classifier recognizers, as tools for morphological operations as dilation, erosion, opening, closing. The above mentioned *min-max* operations on sets of signals are also necessary, which represent structural windows or selected fragments processed images. Many of the morphological operations need to be repeated many times and for all the fragments of the image being processed, therefore, there is an urgent need to reduce the execution time of *min-max* operations and ranking operations. Therefore, the **goal of our work** is to search new options for implementing both signal sorting nodes, including digital, providing increased accuracy and speed, and based on them relational non-linear image processing processor with advanced functionality. In addition, taking into account the recent emergence of a new element base, our task is to prove the possibility of creating on the FPGA, practically in one chip, an image preprocessor (IP) with enhanced technical characteristics and a wide range of commands through the use of a new method of processing pre-ranked signals and (or) their differences. To achieve this goal, it is necessary to simulate the algorithms and methods themselves, and then based on them design and simulate the technical options for the implementation of non-linear IP and their main nodes.

The main computational procedure of most known methods and algorithms used in the creation of biometric systems of machine vision and recognition of objects in images is the comparison of fragments of the current processed image with a template image. The mutual two-dimensional correlation function or convolution with a filter is the most common discriminant measure of mutual matching-comparison of the reference fragment with the current image fragment. At the same time, in the works [10, 11, 12] it was shown that to improve the discriminant properties and quality of recognition-comparison, especially for strongly correlated and noise-damaged images, it is desirable to use recognition methods based on mutual equivalent two-dimensional spatial functions, nonlinear transformations and adaptive-correlation weighting. Therefore, to solve the problems of image recognition and clustering using new spatially invariant models of neural networks, equivalence models (EMs) of autoassociative memory (AAM) and heteroassociative memory (HAM) were proposed [11-15]. Studies of such EMs have shown that these models allow better recognition of images with increased dimensions (vectors with 1024 ÷ 4096 components) and a significant percentage (up to 25-30%) of damage, while the capacity of the AAM can be an order of magnitude higher than the number of neurons representing vector arrays, the set of which is memorized [12, 14, 15]. In addition, it is known that for scene analysis and recognition it is necessary to first solve not only the problem of preliminary filtering, but also the problem of object clustering. Such preliminary clustering allows organizing proper automated data grouping, conducting cluster analysis, evaluating each cluster based on many features, assigning a class label, and improving subsequent training and classification procedures. Since significant advantages of EM were demonstrated when creating on their basis advanced multiport AAM and HAM, neural networks (NN) for parallel cluster analysis of images [7, 15, 16], the current task was to study a more general, spatially invariant (SI) equivalence model (SI EM). Namely, such models that are invariant to spatial displacements require a large number of comparisons of image fragments [7, 16, 17]. And comparisons are basic operations in the most promising paradigms of convolutional neural networks (CNN) with deep learning [7, 17]. In our previous article [7], we considered the issues of new possible ways of self-learning in such extended models, explained some important fundamental concepts of various associative recognition and understanding the principles of functioning of biologically inspired NN-structures, simulated processing processes in them [1], trained and extracted patterns in such models, and also proposed their implementation. In article [17], the authors showed that the concept of self-learning works directly with multi-level images. In SI EM, we calculate spatially dependent normalized equivalence functions (SD_NEF), the elements of which will correspond to the value of the normalized equivalence of the fragment of the input image X and one of the selected fragments from the training matrix. To implement ESLCNS [1, 17], we need some new or modified known devices capable of

calculating normalized spatial equivalence functions (NSEqF) with the required speed and performance. For all known convolutional neural networks, as well as for our equivalence models, it is necessary to calculate the convolution of the current image fragment in each layer with a large number of templates that are used, selected or formed during the training process. However, as studies show, large images require a large number of filters for image processing, and the size of the filters can also be large. Therefore, there is an acute problem of increasing the computational performance of hardware implementations of such convolutional neural networks.

II. Presentation of the main research results

A. Design of the main unit of Image Processor

Our proposed allows ranking of signals and forming output signals are shown in Fig. 1. Structure of digital multifunctional image processor (IP) DMIP_2 based on FPGA with serial input and registers memory to form a vector of signals to be sorted and 1output using sorting unit (SU) based on modified conveyor homogeneous wave structure (MCHWS) consisting of layers of digital comparison switching circuits is shown in Fig.2. Here variant DMIP_1 with 10 inputs and 1 output and supply of all input signals in parallel is not shown. For the convenience of data input, we have developed and modeled a processor DMIP_2 circuit with register memory for fast sequential image input and automatic sequential search of processed windows. It is shown in Fig. 2. Simulation results of DMIP_2 are shown in Fig. 3, 4.

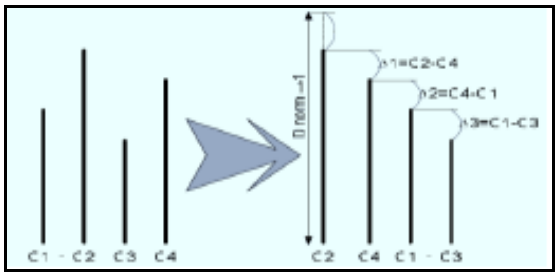


Figure 1. Graphical representation of the processor operations of ranking.

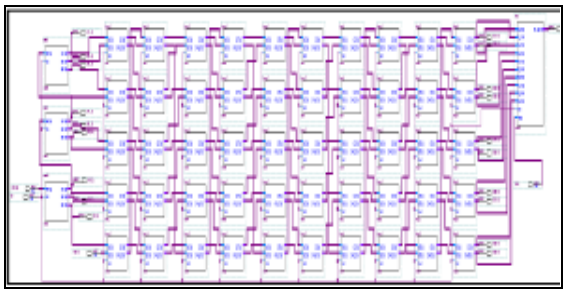
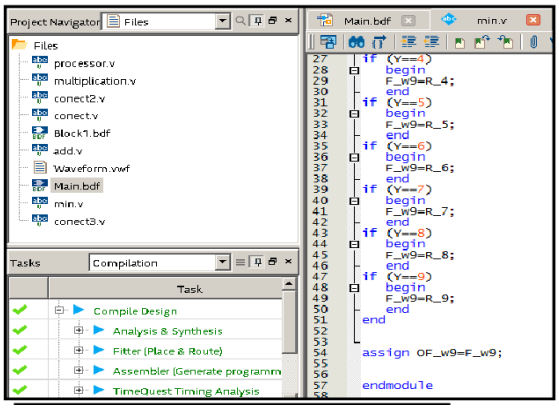


Figure 2. FPGA Structure of DMIP_2 with serial input and registers memory to form a vector of signals to be sorted and 1 output.

Since such processor have output signals that are ranked by value and not by difference of values, by some modification [9, 18, 19, 20] they can be used to organize an additional calculation of the difference of signals having neighboring ranks. Besides, the difference in signal values is also necessary for such a function as nonequivalence. Based on the operations of bounded difference and nonequivalence, a whole set of other continuous logic complex operations and functions are constructed. For example, early we can select one of n signals by rank using multiplexer. There is only 1 output (ranks). And now we can also form signals difference between max signal and next by order. So we can find signal that is proportional to difference of any two signals from ordered set. Such approach allows to formed output complement signals. If one of reference level is D=1 (255) than difference between the reference and any of signals is the complement of the signal. Therefore, we will develop this idea further, taking into account the fact that the selection, amplification, weighting and addition of signals are simple.



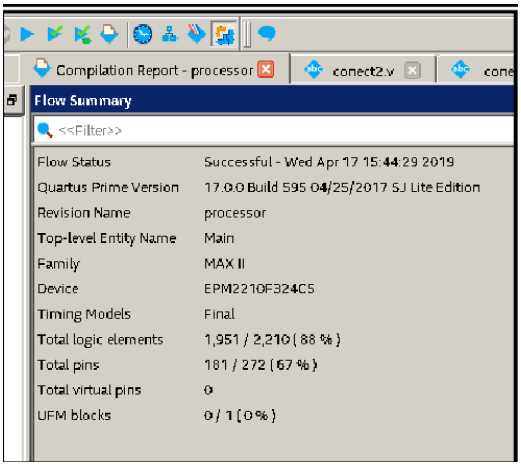


Figure 3. Simulation of DMIP_2 based on FPGA (window fragments).

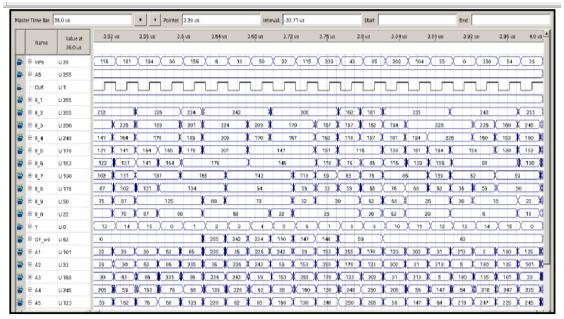


Figure 4. Simulation results of DMIP_2 based on FPGA with serial input and registers memory and 1 output (issuing ranks, one switch)

B. Modeling of digital multifunctional image processor

The simulation results of DMIP_3 (Fig. 5) with serial input and registers memory, 2 outputs for rank and rank differences signals weighing-selection processing are shown in Fig. 6-9. As can be seen from Fig. 3, 4, 6, 7 the resources of the Altera FPGA chip EP3C16F484

Cyclone III family are not fully used in the first case, and in the second for the processor with register memory and two outputs almost completely (there is a small margin).

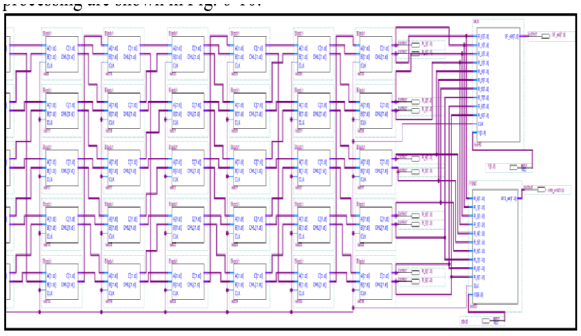


Figure 5. Structure of DMIP_3 based on FPGA with serial input and registers memory to form a vector of signals to be sorted, 2 outputs for rank and rank differences signals weighing-selection processing.

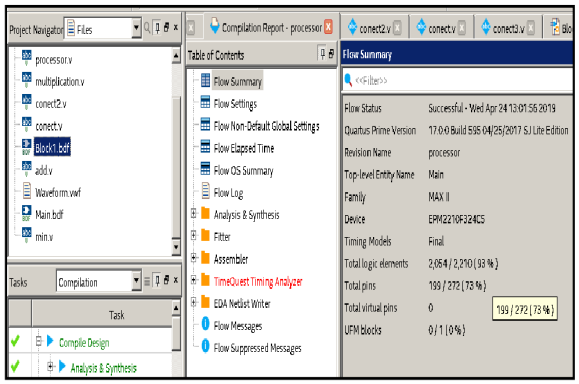


Figure 6. Simulation of DMIP_3 based on FPGA with serial input and 2 output (window fragments).

The processing cycle in the pipelined structure of DMIP and SU did not exceed 25 nanoseconds, which makes it possible to achieve an input / output rate of pixels of the processed and processed images at the level of 40MHz. During the processing cycle, DMIP_1 essentially performs (9*ln9-estimates for the best algorithms!) Sorting operations and generates all the ranks and their differences, which gives, taking into account the wide variety of output functions, performance estimates of at least 10^9 operations per second.

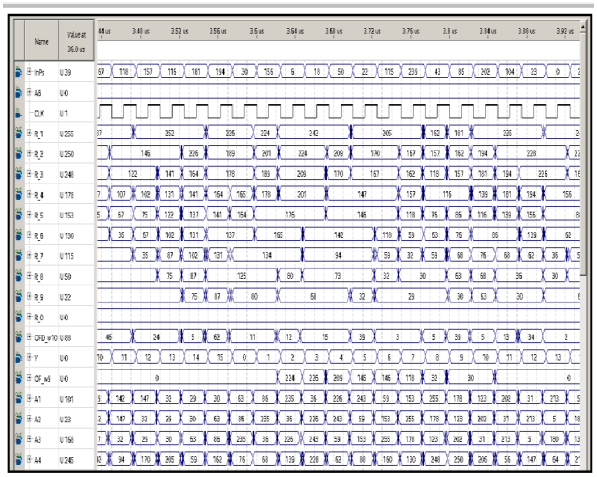


Figure 7. Simulation results of DMIP_3 with 2 outputs (issuing ranks, two switches) in case of formation of a difference of ranks r2-r3.

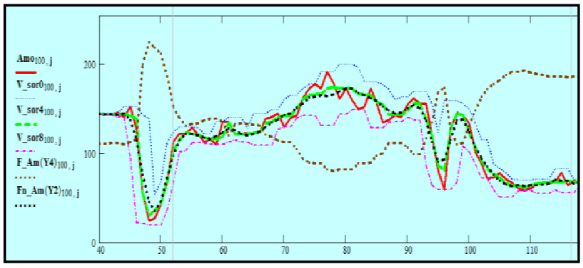


Figure 8. A good example of image line processing using proposed DMIP: Original line (red) and received rank and other output functions.

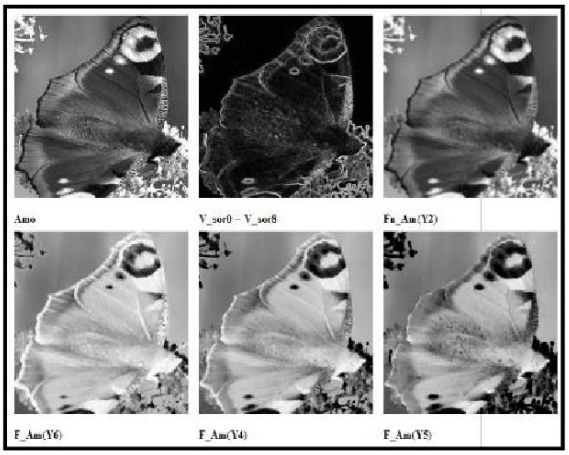


Figure 9. The results of the Amo image transformations using DMIP for different rank values and different functions defined by the control vector Y.

III. Discussion

The results obtained confirm the correctness of the chosen concept and the possibility of creating digital multifunctional image processors with an expanded set of nonlinear signal processing operations, including rank and its modifications. In addition, such processors can be easily and quickly and efficiently configured for the desired type and function of processing-transformation. At the same time, it should be noted that with an increase in the size of the filters, i.e. the number of signals to be ranked, the costs of sorting-ranking when implemented in digital formats and the duration of the operation can significantly increase. But one of the options for solving this problem is the implementation of this concept of building an image processor on analog devices, for example, on current mirrors, i.e. the use of processing in analog or hybrid formats. Similar conceptual approaches were proposed in the works [21, 22], where the developed and modeled so-called equivalent neurons were described, which have a processing-conversion time of 0.1-1μs, low supply voltages of 1.8-3.3V, insignificant relative computational errors (1-5%), low consumption of no more than 1-2mW, can operate in low power consumption modes (less than 100μW) and high-speed (10-20MHz) modes. Therefore, it is necessary to further conduct a comparative analysis of these two (digital and analog) formats for implementing the proposed concept of building multifunctional image processors. Their comparison is especially important from the point of view of efficiency relative to energy consumption, since the efficiency of neuro-equivalentors relative to energy

consumption is estimated at a level of no less than 10^12 an. op./s per W and can be increased by an order of magnitude [21, 22].

The developed processors can become the basis for the implementation of convolutional NNs and self-learning biologically inspired devices with a code-controlled choice of the type of nonlinear, as well as linear, functional transformation and a significant number of processing channels due to the integration of an array of neural-like processors into a chip to implement parallel computing of equivalental convolutions.

IV. Conclusions

We show the results of design the new FPGA-DMIPs with digital accuracy. Calculations show that in the case of using Altera FPGA chip EP3C16F484 of Cyclone III family, it is possible to implement DMIP for image size of 64*64 and window 3*3 in the one chip. For 2.5V and clock frequency of 200MHz the power consumption will be at the level of 200mW and the calculation time for pixel of filters will be 25ns.

References

[1] Krasilenko, V. G., Nikolskyy, A. I., Lazarev A.A., “Designing and simulation smart multifunctional continuous logic device as a basic cell of advanced high-performance sensor systems with MIMO-structure,” in Proceedings of SPIE, 94500N (2015).

[2] Lei Yi, Guangbao Shan, Song Liu, Chengmin Xie, High-performance processor design based on 3D on-chip cache, Microprocessors and Microsystems, Volume 47, 2016, Pages 486-490, ISSN 0141-9331, http://dx.doi.org/10.1016/j.micpro.2016.07.009

[3] Krasilenko, V., Ogorodnik, K., Nikolskyy, A., Dubchak, V., “Family of optoelectronic photocurrent reconfigurable universal (or multifunctional) logical elements (OPR ULE) on the basis of continuous logic operations (CLO) and current mirrors (CM), ” Proc. SPIE, 8001, (2011).

[4] Krasilenko, V. G., Nikolskyy, A. I., Lazarev, A. A., "Multichannel serial-parallel analog-to-digital converters based on current mirrors for multi-sensor systems", Proc. SPIE 8550, Optical Systems Design 2012, 855022 (2013); doi:10.1117/12.2001703.

[5] Krasilenko, V. G., Lazarev, A. A., Nikitovich, D. V., "Simulation of continuously logical base cells (CL BC) with advanced functions for analog-to-digital converters and image processors," Proc. SPIE 10438, 104380K (2017).

[6] Krasilenko, V., Nikolskyy, A., Zaitsev A., Voloshin V., “Optical pattern recognition algorithms on neural-logic equivalent models and demonstration of their prospects and possible implementations,” Proc. SPIE 4387, 247 –260 (2001).

[7] Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V., "Modeling and possible implementation of self-learning equivalence-convolutional neural structures for auto-encoding-decoding and clusterization of images", Proceedings of SPIE Vol. 10453, 104532N (2017).

[8] Volgin, L.I., Mishin, V.A., “Is the future digital or analog?,” Information technologies in electric power industry: Cheboksary: RESCNIT, 86-89, (1998).

[9] Krasilenko, V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V., "Design and simulation of image nonlinear processing relational preprocessor based on iterational sorting node," Proc. SPIE 11028, Optical Sensors 2019, 110282X (11 April 2019); doi: 10.1117/12.2524114.

[10] Krasilenko, V. G., Saletsky, F. M., Yatskovsky, V. I., Konate, K., "Continuous logic equivalence models of Hamming neural network architectures with adaptive-correlated weighting," Proceedings of SPIE Vol. 3402, pp. 398-408 (1998).

[11] Krasilenko, V. G., Magas, A. T., "Multiport optical associative memory based on matrix-matrix equivalentors," Proceedings of SPIE Vol. 3055, pp. 137 – 146.

[12] Krasilenko V.G., Nikitovich D.V., “Experimental studies of spatially invariant equivalence models of associative and hetero-associative memory 2D images,” Systemy obrobky informaciji, 4 (120), 113 –120 (2014).

[13] Krasilenko V.G., Nikolskyy, A. I., “The associative 2D-memories based on matrix-tensor equivalental models,” Radioelektronika Inform. Communication, 2 (8), 45 –54 (2002).

[14] Krasilenko, V. G., Lazarev, A., Grabovlyak, S., "Design and simulation of a multiport neural network heteroassociative memory for optical pattern recognitions," Proceedings of SPIE Vol. 8398, 83980N-1 (2012).

[15] Krasilenko V. G., Lazarev, A., Grabovlyak, S., Nikitovich D.V., "Using a multi-port architecture of neural-net associative memory based on the equivalency paradigm for parallel cluster image analysis and self-learning," Proceedings of SPIE Vol. 8662, 86620S (2013).

[16] Krasilenko V.G., Nikitovich D.V., "Simulation of self-learning clustering methods for selecting and grouping similar patches, using two-dimensional nonlinear space-invariant models and functions of normalized "equivalence," Electronics and information technologies: collected scientific papers, Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, Issue 6, pp. 98-110 (2015).

[17] Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V., "Modeling of biologically motivated self-learning equivalent-convolutional recurrent-multilayer neural structures (BLM_SL_EC_RMNS) for image fragments clustering and recognition", Proceedings of SPIE Vol. 10609, MIPPR 2017: Pattern Recognition and Computer Vision, 106091D (8 March 2018); doi: 10.1117/12.2285797.

[18] Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V. "Design of neuron-calculators for the normalized equivalence of two matrix arrays based on FPGA for self-learning equivalently convolutional neural networks (SLE_CNNs)". Proc. SPIE 10996, Real-Time Image Processing and Deep Learning. 2019. 109960P (14 May 2019); doi: 10.1117/12.2518206; https://doi.org/10.1117/12.2518206

[19] Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V. "Rank differences of signals by weighing-selection processing method for implementation of multifunctional image processing processor". Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence IV, Richard C. Hollins; Gerald S. Buller; Robert A. Lamb; Martin Laurenzis, Editors. Proceedings of SPIE 11163. 2019. (SPIE, Bellingham, WA 2019), 111630J.

[20] Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V. "Modeling nonlinear image processing algorithms using a processor based on the sorting node". Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence IV, Richard C. Hollins; Gerald S. Buller;Robert A. Lamb; Martin Laurenzis, Editors. Proceedings of SPIE 11163. 2019. (SPIE, Bellingham, WA 2019), 111630I.

[21] Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V. Design and Simulation of Array Cells of Mixed Sensor Processors for Intensity Transformation and Analog-Digital Coding in Machine Vision. Machine Vision and Navigation. monograph. Springer. 2020. P. 87-132. ISBN 978-3-030-22586-5 ISBN 978-3-030-22587-2 (eBook) https://doi.org/10.1007/978-3-030-22587-2

[22] Krasilenko, V., Nikitovych, D., Lazarev, A. Modeling Nodes and Cells of Neuron-Equivalentors as Accelerators of Equivalental-Convolutional Self-Learning Neural Structures. Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International SP Conference, (7), 247–250. (2025). https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.077

MCIT
Modeling, control & information technologies

On The Improving Algorithm for Stitching Images

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.072

Adalat Pashayev
Department of Fundamental Sciences
National Defense University
Baku, Azerbaijan
adalat.pashayev@gmail.com

Elkhan Sabziev
Department of Fundamental Sciences
National Defense University
Baku, Azerbaijan
elkhan.sabziev@gmail.com

Sadig Malikov
Laboratory of modeling and control of continuous processes
Institute of Control Systems
Baku, Azerbaijan
sadiq.parvizoglu@gmail.com

***Abstract*—Image stitching is a fundamental problem in computer vision, enabling the creation of panoramas by aligning and blending multiple overlapping images. While traditional blending methods such as averaging or feathering are computationally efficient, they often produce visible artifacts including ghosting, seams, and intensity discontinuities, especially under exposure variations or geometric misalignments. Advanced techniques like multi-band or Poisson blending improve quality but are computationally expensive, limiting real-time applicability. To address these challenges, we propose a stitching framework that integrates rotation-robust geometric alignment with an optimized distance-based alpha blending strategy. By computing per-pixel distance maps from valid image regions and adaptively weighting contributions, the method achieves smoother transitions, reduced artifacts, and improved structural consistency. Extensive experiments demonstrate that the proposed approach outperforms classical and advanced blending techniques in both visual quality and computational efficiency, making it suitable for offline panorama generation as well as real-time video stitching applications.**

Keywords—image stitching, panorama generation, geometric alignment, distance-based alpha blending, seam reduction, ghosting artifacts, real-time video stitching, computational efficiency.

I. Introduction

Image stitching has become a fundamental task in computer vision and graphics, enabling the creation of high-quality panoramas by combining multiple overlapping images. Traditional stitching pipelines typically consist of two main stages: geometric alignment and blending. Geometric alignment ensures that corresponding points between images are properly registered, maintaining spatial consistency, while blending aims to hide seams in overlapping regions. Despite the maturity of these pipelines, blending remains a significant challenge, as simple techniques such as averaging or feathering often produce visible artifacts, including ghosting, intensity discontinuities, and color mismatches, particularly in areas with exposure differences or irregular overlaps [1].

Advanced blending methods, such as multi-band blending or Poisson blending, improve visual quality by addressing these artifacts more effectively [2],[3]. However, they are computationally expensive, limiting their applicability in real-time or resource-constrained scenarios. Distance-based alpha blending has been explored as a lightweight alternative, in which pixel contributions are weighted according to their distance from valid region boundaries, producing smoother transitions with lower computational cost [4]. Nevertheless, prior implementations often lack robustness to misalignments caused by rotational differences or fail to fully exploit geometric information during blending.

In this work, we build upon our previous method for rotation-robust geometric alignment and integrate it with an optimized distance-based alpha blending strategy. By leveraging per-pixel distance maps derived from valid image regions, our approach reduces seam artifacts while preserving structural consistency across overlapping images. Moreover, the method is designed to be computationally efficient, making it suitable for both offline panorama generation and real-time video stitching applications. Through extensive experiments, we demonstrate that our integration of rotation-aware alignment and distance-based blending achieves superior visual quality with minimal computational overhead compared to classical and advanced blending techniques.

II. Problem Statement

Despite significant advances in image stitching, generating seamless panoramas remains a challenging problem due to artifacts introduced during blending. Traditional blending techniques, such as simple averaging or feathering, are computationally efficient but often fail to handle exposure variations, irregular

overlaps, and slight misalignments between images, resulting in visible seams, ghosting, or intensity discontinuities. Advanced methods like multi-band blending or Poisson blending improve visual quality but are computationally intensive, making them unsuitable for real-time applications or high-resolution video stitching.

Moreover, existing distance-based alpha blending approaches, while lightweight, often do not account for rotation-induced misalignments or do not fully leverage geometric alignment information. Consequently, there is a need for a blending strategy that simultaneously satisfies three key requirements:

A. Seamless visual quality

Minimizing artifacts such as ghosting, intensity discontinuities, and color mismatches.

B. Robustness to geometric misalignment

Maintaining smooth transitions even when images have slight rotational differences or irregular overlaps.

C. Computational efficiency

Enabling real-time or high-resolution panorama stitching without significant performance overhead.

This work addresses these challenges by combining rotation-robust geometric alignment with an optimized distance-based alpha blending method, aiming to produce high-quality panoramas efficiently in both offline and real-time scenarios.

III. Problem Solution

Building upon our previous rotation-robust geometric alignment framework, this work focuses on improving seamless blending for stitched panoramas while maintaining computational efficiency [5]. The proposed method integrates optimized distance-based alpha blending with aligned images to reduce seam artifacts and preserve photometric and structural consistency.

For each overlapping pixel (x, y), we first compute a distance map from the boundaries of valid regions in each image:

$$d_i(x,y) = \min_{(x_b,y_b)\in\partial R_i} \sqrt{(x-x_b)^2 + (y-y_b)^2}, \quad i \in \{1,2\}$$

where ∂R_i represents the boundary of the valid region in image I_i. Using these distances, the alpha blending weight is defined as:

$$\alpha(x,y) = \frac{d_1(x,y)}{d_1(x,y) + d_2(x,y)}$$

The final blended pixel value is computed as:

$$I_B(x,y) = \alpha(x,y) \cdot I_1(x,y) + (1 - \alpha(x,y)) \cdot I_2(x,y)$$

This formulation ensures that pixels closer to the center of each valid region contribute more, while pixels near the boundaries have less influence, producing smoother transitions and reducing ghosting, intensity discontinuities, and visible seams.

To further improve blending quality, the method can incorporate adaptive confidence weights $w_i(x,y)$, for example based on local intensity variance:

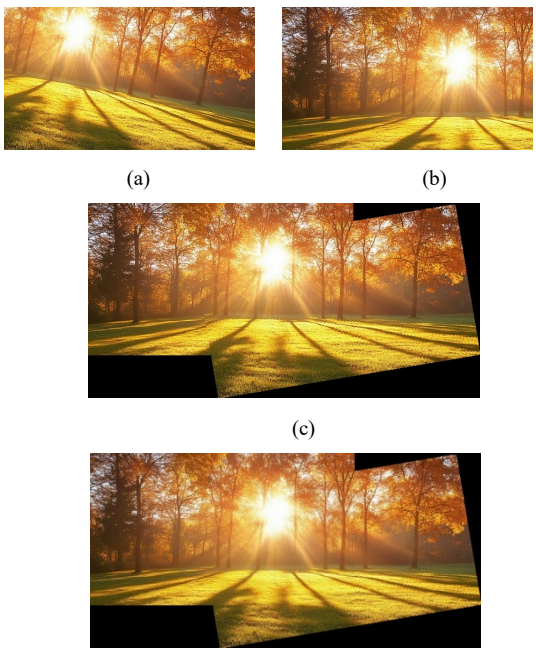
$$\alpha(x,y) = \frac{d_1(x,y) \cdot w_1(x,y)}{d_1(x,y) \cdot w_1(x,y) + d_2(x,y) \cdot w_2(x,y)}$$

Finally, the distance-based blending operates on geometrically aligned images from the rotation-robust framework, preserving structural consistency while remaining computationally efficient. Lightweight per-pixel operations and efficient distance map computation allow the method to be applied to high-resolution images and real-time video stitching. Experiments demonstrate that this approach enhances visual quality compared to classical blending techniques while maintaining the performance required for real-time applications.

IV. Sample Results

To evaluate the effectiveness of the proposed blending strategy, we conducted experiments on multiple image pairs. Fig. 1(a) and Fig. 1(b) show two input images captured with overlapping regions. After geometric alignment, the stitched panorama is obtained as shown in Fig. 1(c). However, visible seams and intensity inconsistencies remain in the overlapping areas. By applying the proposed distance-based alpha blending, a seamless result is achieved, as illustrated in Fig. 1(d).

Figure 1. Comparison of stitching results: (a) Input Image 1, (b) Input Image 2, (c) Stitched (pre-blending), and (d) Seamless (post-blending).



The comparison between Fig. 1(c) and Fig. 1(d) clearly demonstrates the effectiveness of the blending strategy in reducing ghosting artifacts and producing smooth transitions across image boundaries. This confirms that the integration of rotation-robust alignment with optimized distance-based blending

provides both structural consistency and improved visual quality.

V. CONCLUSİON

In this work, we addressed the persistent challenges of seamless image stitching by integrating rotation-robust geometric alignment with an optimized distance-based alpha blending strategy. Traditional blending methods often struggle with artifacts such as ghosting, intensity discontinuities, and color mismatches, especially under rotational misalignments or irregular overlaps. Advanced methods improve visual quality but are computationally expensive, limiting their applicability in real-time scenarios.

Our proposed approach leverages per-pixel distance maps from valid image regions to assign blending weights, ensuring smoother transitions and reducing seam artifacts. By combining this with robust geometric alignment, the method maintains structural consistency across overlapping images while remaining computationally efficient. Extensive experiments demonstrate that the approach achieves superior visual quality compared to classical and advanced blending techniques, without imposing significant computational overhead.

Overall, this work provides an effective and practical solution for high-quality panorama generation and real-time video stitching, balancing seamless visual quality, robustness to misalignments, and computational efficiency.

REFERENCES

[1] M. Uyttendaele, A. Eden, and R. Skeliski, “Eliminating ghosting and exposure artifacts in image mosaics,” Aug. 2005, doi: https://doi.org/10.1109/cvpr.2001.991005.

[2] C. Allene, J.-P. Pons, and Renaud Keriven, “Seamless image-based texture atlases using multi-band blending,” Proceedings - International Conference on Pattern Recognition/Proceedings/International Conference on Pattern Recognition, pp. 1–4, Dec. 2008, doi: https://doi.org/10.1109/icpr.2008.4761913.

[3] R. Szeliski, M. Uyttendaele, and D. Steedly, “Fast Poisson blending using multi-splines,” CiteSeer X (The Pennsylvania State University), pp. 1–8, Apr. 2011, doi: https://doi.org/10.1109/iccphot.2011.5753119.

[4] V. Megha and K. K. Rajkumar, “Automatic Satellite Image Stitching Based on Speeded Up Robust Feature,” 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Machine Vision (AIMV), pp. 1–6, Sep. 2021, doi: https://doi.org/10.1109/aimv53313.2021.9670954.

[5] S. Malikov and A. Pashayev, “On Some Algorithms for Stitching Images,” in Proc. PCI, 2025, in press.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Combined Boundary Problem of 2D in the Geometrical Middle -1D in the Middle-1D Multi-Point type in the Non-Classical Treatment for 4D Bianchi Equation with Non-Smooth Coefficients, Arising in the Modeling of Vibration Processes and Integral Representation

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.073

Ilgar Mamedov
Institute of Control Systems,
Baku, Azerbaijan
ilgarmamedov@isi.az

Ashraf Huseynov
Sumgait State University,
Sumgait, Azerbaijan
esref.huseynov@mmu.edu.az

Aynura Abdullayeva
Military Research Institute of the National Defense University,
Baku, Azerbaijan
aynure.abdullayeva@mmu.edu.az

Abstract In this paper substantiated for a 4D Bianchi equation with non-smooth coefficients a four dimensional combined boundary problem - 4D combined boundary problem of 2D in the geometrical middle-1D in the middle-1D multi-point type with non-classical boundary conditions is considered, which requires no matching conditions. Equivalence of these conditions four dimensional boundary condition is substantiated classical, in the case if the solution of the problem in the isotropic S. L. Sobolev's space is found. The considered equation as a hyperbolic equation generalizes not only classic equations of mathematical physics (Laplace equation, telegraph equation, string vibration equation) and also many models differential equations (3D and 4D telegraph equation, 3D Bianchi equation, 3D and 4D wave equations and etc.). It is grounded that the 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point combined boundary conditions in the classic and non-classic treatment are equivalent to each other. Thus, namely in this paper, the non-classic problem with 4D combined boundary problem of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type conditions is grounded for a hyperbolic equation of fourth-order. For simplicity, this was demonstrated for one model case in one of S.L. Sobolev isotropic space $W_p^{(1,1,1,1)}(G)$.

Key words: 4D combined boundary problem of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type, 4D Bianchi equation, 4D mathematical modeling, hyperbolic equations, equation with non-smooth coefficients, equations with dominating mixed derivative.

2010 Mathematics Subject Classifications: 35L25, 35L35.

1. Introduction

Hyperbolic equations are attracted for sufficiently adequate description of a great deal of real processes occurring in the nature, engineering and etc. In particular, many processes arising in the theory of fluid filtration in cracked media are described by non-smooth coefficient hyperbolic equations.

Urgency of investigations conducted in this field is

explained by appearance of local and non-local problems for non-smooth coefficients equations connected with different applied problems. Such type problems arise for example, while studying the problems of moisture, transfer in soils, heat transfer in heterogeneous media, diffusion of thermal neutrons in inhibitors, simulation of different biological processes, phenomena and etc. [1-3].

In the present paper, here consider four dimensional combined boundary problem- 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point combined boundary problem for 4D Bianchi equation with non-smooth coefficients. The coefficients in this hyperbolic equation are not necessarily differentiable; therefore, there does not exist a formally adjoint differential equation making a certain sense. For this reason, this question cannot be investigated by the well-known methods using classical integration by parts and Riemann functions or classical-type fundamental solutions. The theme of the present paper, devoted to the investigation 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point combined boundary problem for 4D Bianchi equations of hyperbolic type, according to the above-stated is very actual for the solution of theoretical and practical problems. From this point of view, the paper is devoted to the actual problems of applied mathematics and physics.

2. Problem Statement

Consider 4D Bianchi equation

$$(V_{1,1,1,1}u)(x,y,z,t) \equiv \sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1}\sum_{m=0}^{1}\sum_{n=0}^{1} A_{i,j,m,n}(x,y,z,t) D_x^i D_y^j D_z^m D_t^n u(x,y,z,t) =$$

$$= f_{1,1,1,1}(x,y,z,t) \in L_p(G), \qquad (A_{1,1,1,1}(x,y,z,t) \equiv 1), \tag{1}$$

Here $u(x,y,z,t)$ is a desired function determined on G; $A_{i,j,m,n}(x,y,z,t)$ are the given measurable functions on $G = G_1 \times G_2 \times G_3 \times G_4$, where $G_1 = (x_0, h_1)$, $x_0 \geq 0$, $G_2 = (y_0, h_2)$, $G_3 = (z_0, h_3)$, $z_0 \geq 0$, $G_4 = (t_0, T)$; $f_{1,1,1,1}(x,y,z,t)$ is a given measurable function on G.

Equation (1) is a four dimensional Bianchi equation with four simple real characteristics $x = const$, $y = const$, $z = const$, $t = const$. Therefore, in some sense we can consider equation (1) as a hyperbolic equation. Equations of the form (1) are used in the modeling of vibration processes [4].

In the present paper 4D Bianchi equation (1) is considered in the general case when the coefficients $A_{i,j,m,n}(x,y,z,t)$ are non-smooth

functions satisfying only the following conditions:

$$A_{0,0,0,0}(x,y,z,t) \in L_p(G);\ A_{1,0,0,0}(x,y,z,t) \in L_{\infty,p,p,p}^{x,y,z,t}(G);\ A_{0,1,0,0}(x,y,z,t) \in L_{p,\infty,p,p}^{x,y,z,t}(G);$$

$$A_{0,0,1,0}(x,y,z,t) \in L_{p,p,\infty,p}^{x,y,z,t}(G);\ A_{0,0,0,1}(x,y,z,t) \in L_{p,p,p,\infty}^{x,y,z,t}(G);\ A_{1,1,0,0}(x,y,z,t) \in L_{\infty,\infty,p,p}^{x,y,z,t}(G);$$

$$A_{1,0,1,0}(x,y,z,t) \in L_{\infty,p,\infty,p}^{x,y,z,t}(G); \quad A_{1,0,0,1}(x,y,z,t) \in L_{\infty,p,p,\infty}^{x,y,z,t}(G); \quad A_{0,1,1,0}(x,y,z,t) \in L_{p,\infty,\infty,p}^{x,y,z,t}(G);$$

$$A_{0,1,0,1}(x,y,z,t) \in L_{p,\infty,p,\infty}^{x,y,z,t}(G); \quad A_{0,0,1,1}(x,y,z,t) \in L_{p,p,\infty,\infty}^{x,y,z,t}(G); \quad A_{1,1,1,0}(x,y,z,t) \in L_{\infty,\infty,\infty,p}^{x,y,z,t}(G);$$

$$A_{1,1,0,1}(x,y,z,t) \in L_{\infty,\infty,p,\infty}^{x,y,z,t}(G);\ A_{0,1,1,1}(x,y,z,t) \in L_{p,\infty,\infty,\infty}^{x,y,z,t}(G);\ A_{1,0,1,1}(x,y,z,t) \in L_{\infty,p,\infty,\infty}^{x,y,z,t}(G).$$

Under these conditions, we'll look for the solution $u(x,y,z,t)$ of equation (1)

in S.L.Sobolev isotropic space

$$W_p^{(1,1,1,1)}(G) \equiv \left\{u(x,y,z,t) : D_x^i D_y^j D_z^m D_t^n u(x,y,z,t) \in L_p(G), \quad i,j,m,n = \overline{0,1}\right\},$$

where $1 \le p \le \infty$. $D_\xi^i = \partial^i / \partial \xi^i$ is a generalized differentiation operator in S.L.Sobolev sense, D_ξ^0 is an identity transformation operator. We'll define the norm in the space $W_p^{(1,1,1,1)}(G)$ by the equality

$$\|u\|_{W_p^{(1,1,1,1)}(G)} = \sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1}\sum_{m=0}^{1}\sum_{n=0}^{1}\left\|D_x^i D_y^j D_z^m D_t^n u\right\|_{L_p(G)}$$

For 4D Bianchi equation (1) we can give the classic form 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point combined boundary conditions in the form :

$$\begin{cases} u(x,y,z,t)\big|_{x=\sqrt{x_0 h_1}} = B(y,z,t), (y,z,t) \in G_2 \times G_3 \times G_4; \\ u(x,y,z,t)\big|_{y=\frac{y_0+h_2}{2}} = P(x,z,t), (x,z,t) \in G_1 \times G_3 \times G_4; \\ u(x,y,z,t)\big|_{z=\sqrt{z_0 h_3}} = \Psi(x,y,t), (x,y,t) \in G_1 \times G_2 \times G_4; \\ u(x,y,z,t)\big|_{t=t_k} = S_k(x,y,z), (x,y,z) \in G_1 \times G_2 \times G_3. \end{cases} \tag{2}$$

where $B(y,z,t)$, $P(x,z,t)$, $\Psi(x,y,t)$ and $S_k(x,y,z)$ are the given measurable functions on G. Notice that here we assume t_k, $k = 1,2,...,N$ are the fixed points from $\bar{G}_4$. It is obvious that in the case of conditions (2), in addition to the conditions

$$B(y,z,t) \in W_p^{(1,1,1)}(G_2 \times G_3 \times G_4) \equiv \left\{\tilde{\tilde{B}}(y,z,t) : D_y^j D_z^m D_t^n \tilde{\tilde{B}}(y,z,t) \in L_p(G_2 \times G_3 \times G_4), \quad j,m,n = \overline{0,1}\right\};$$

$$P(x,z,t) \in W_p^{(1,1,1)}(G_1 \times G_3 \times G_4) \equiv \left\{\tilde{\tilde{P}}(x,z,t) : D_x^i D_z^m D_t^n \tilde{\tilde{P}}(x,z,t) \in L_p(G_1 \times G_3 \times G_4), \quad i,m,n = \overline{0,1}\right\};$$

$$\Psi(x,y,t) \in W_p^{(1,1,1)}(G_1 \times G_2 \times G_4) \equiv \left\{\tilde{\tilde{\Psi}}(x,y,t) : D_x^i D_y^j D_t^n \tilde{\tilde{\Psi}}(x,y,t) \in L_p(G_1 \times G_2 \times G_4), \quad i,j,n = \overline{0,1}\right\};$$

and

$$S_k(x,y,z) \in W_p^{(1,1,1)}(G_1 \times G_2 \times G_3) \equiv \left\{\tilde{\tilde{S}}_k(x,y,z) : D_x^i D_y^j D_z^m \tilde{\tilde{S}}_k(x,y,z) \in L_p(G_1 \times G_2 \times G_3), \quad i,j,m = \overline{0,1}\right\};$$

the given functions should also satisfy the following agreement conditions:

$$\begin{cases} B(y,z,t)\big|_{y=\frac{y_0+h_2}{2}} = P(x,z,t)\big|_{x=\sqrt{x_0 h_1}}, \\ B(y,z,t)\big|_{z=\sqrt{z_0 h_3}} = \Psi(x,y,t)\big|_{x=\sqrt{x_0 h_1}}, \\ B(y,z,t)\big|_{t=t_k} = S_k(x,y,z)\big|_{x=\sqrt{x_0 h_1}}, \\ P(x,z,t)\big|_{z=\sqrt{z_0 h_3}} = \Psi(x,y,t)\big|_{y=\frac{y_0+h_2}{2}}, \\ P(x,z,t)\big|_{t=t_k} = S_k(x,y,z)\big|_{y=\frac{y_0+h_2}{2}}, \\ \Psi(x,y,t)\big|_{t=t_k} = S_k(x,y,z)\big|_{z=\sqrt{z_0 h_3}}. \end{cases} \tag{3}$$

Consider the following non-classical 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point combined boundary conditions :

$$
\begin{cases}
V^{(k)}_{0,0,0,0}u \equiv u(\sqrt{x_0h_1}, \dfrac{y_0+h_2}{2}, \sqrt{z_0h_3}, t_k) = f^{(k)}_{0,0,0,0} \in R; \\
(V^{(k)}_{1,0,0,0}u)(x) \equiv u_x(x, \dfrac{y_0+h_2}{2}, \sqrt{z_0h_3}, t_k) = f^{(k)}_{1,0,0,0}(x) \in L_p(G_1); \\
(V^{(k)}_{0,1,0,0}u)(y) \equiv u_y(\sqrt{x_0h_1}, y, \sqrt{z_0h_3}, t_k) = f^{(k)}_{0,1,0,0}(y) \in L_p(G_2); \\
(V^{(k)}_{0,0,1,0}u)(z) \equiv u_z(\sqrt{x_0h_1}, \dfrac{y_0+h_2}{2}, z, t_k) = f^{(k)}_{0,0,1,0}(z) \in L_p(G_3); \\
(V_{0,0,0,1}u)(t) \equiv u_t(\sqrt{x_0h_1}, \dfrac{y_0+h_2}{2}, \sqrt{z_0h_3}, t) = f_{0,0,0,1}(t) \in L_p(G_4); \\
(V^{(k)}_{1,1,0,0}u)(x,y) \equiv u_{xy}(x, y, \sqrt{z_0h_3}, t_k) = f^{(k)}_{1,1,0,0}(x,y) \in L_p(G_1 \times G_2); \\
(V^{(k)}_{1,0,1,0}u)(x,z) \equiv u_{xz}(x, \dfrac{y_0+h_2}{2}, z, t_k) = f^{(k)}_{1,0,1,0}(x,z) \in L_p(G_1 \times G_3); \\
(V_{1,0,0,1}u)(x,t) \equiv u_{xt}(x, \dfrac{y_0+h_2}{2}, \sqrt{z_0h_3}, t) = f_{1,0,0,1}(x,t) \in L_p(G_1 \times G_4); \\
(V^{(k)}_{0,1,1,0}u)(y,z) \equiv u_{yz}(\sqrt{x_0h_1}, y, z, t_k) = f^{(k)}_{0,1,1,0}(y,z) \in L_p(G_2 \times G_3); \\
(V_{0,1,0,1}u)(y,t) \equiv u_{yt}(\sqrt{x_0h_1}, y, \sqrt{z_0h_3}, t) = f_{0,1,0,1}(y,t) \in L_p(G_2 \times G_4); \\
(V_{0,0,1,1}u)(z,t) \equiv u_{zt}(\sqrt{x_0h_1}, \dfrac{y_0+h_2}{2}, z, t) = f_{0,0,1,1}(z,t) \in L_p(G_3 \times G_4); \\
(V^{(k)}_{1,1,1,0}u)(x,y,z) \equiv u_{xyz}(x, y, z, t_k) = f^{(k)}_{1,1,1,0}(x,y,z) \in L_p(G_1 \times G_2 \times G_3); \\
(V_{1,1,0,1}u)(x,y,t) \equiv u_{xyt}(x, y, \sqrt{z_0h_3}, t) = f_{1,1,0,1}(x,y,t) \in L_p(G_1 \times G_2 \times G_4); \\
(V_{0,1,1,1}u)(y,z,t) \equiv u_{yzt}(\sqrt{x_0h_1}, y, z, t) = f_{0,1,1,1}(y,z,t) \in L_p(G_2 \times G_3 \times G_4); \\
(V_{1,0,1,1}u)(x,z,t) \equiv u_{xzt}(x, \dfrac{y_0+h_2}{2}, z, t) = f_{1,0,1,1}(x,z,t) \in L_p(G_1 \times G_3 \times G_4).
\end{cases}
\tag{4}
$$

3.

Methodology

Therewith, the important principal moment is that the considered equation possesses nonsmooth coefficients satisfying only some p -integrability and boundedness conditions i.e. the considered hyperbolic operator $V_{1,1,1,1}$ has no traditional conjugated operator. In other words, the Riemann function for this equation can't be investigated by the classical method of characteristics. In the papers [5-7] the Riemann function is determined as the solution of an integral equation. This is more natural than the classical way for deriving the Riemann function. The matter is that in the classic variant, for determining the Riemann function, the rigid smooth conditions on the coefficients of the equation are required.

The Riemann's method does not work for hyperbolic equations with non-smooth coefficients. Especially it should be noted that a variety of boundary-value problems for the equations of Bianchi studied in [8-13] and etc.

In the present paper, a method that essentially uses modern methods of the theory of functions and functional analysis is worked out for investigations of such problems. In the main, this method it requested in conformity to hyperbolic equations of fourth-order with simple real characteristics. Notice that, in this paper the considered equation is a generation of many model equations of some processes (for example, 3D and 4D telegraph equation,

3D Bianchi equation, 3D and 4D wave equations and etc).

If the function $u \in W_p^{(1,1,1,1)}(G)$ is a solution of the classical form 4D combined boundary problem of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type (1), (2), then it is also a solution of problem (1), (4) qualities:

for $f_{i_1,i_2,i_3,i_4}^{(k)}$ *and* f_{i_1,i_2,i_3,i_4} ,

$i_k = \overline{0,1}, k = \overline{1,4}$ defined by the following e

$$f_{0,0,0,0}^{(k)} = B(\frac{y_0+h_2}{2}, \sqrt{z_0 h_3}, t_k) = P(\sqrt{x_0 h_1}, \sqrt{z_0 h_3}, t_k) = \Psi(\sqrt{x_0 h_1}, \frac{y_0+h_2}{2}, t_k) = S_k(\sqrt{x_0 h_1}, \frac{y_0+h_2}{2}, \sqrt{z_0 h_3});$$

$$f_{1,0,0,0}^{(k)}(x) = \frac{\partial P(x,z,t)}{\partial x}/_{z=\sqrt{z_0 h_3}, t=t_k} = \frac{\partial \Psi(x,y,t)}{\partial x}/_{y=\frac{y_0+h_2}{2}, t=t_k} = \frac{\partial S_k(x,y,z)}{\partial x}/_{y=\frac{y_0+h_2}{2}, z=\sqrt{z_0 h_3}};$$

$$f_{0,1,0,0}^{(k)}(y) = \frac{\partial \Psi(x,y,t)}{\partial y}/_{x=\sqrt{x_0 h_1}, t=t_k} = \frac{\partial S_k(x,y,z)}{\partial y}/_{x=\sqrt{x_0 h_1}, z=\sqrt{z_0 h_3}} = \frac{\partial B(y,z,t)}{\partial y}/_{z=\sqrt{z_0 h_3}, t=t_k};$$

$$f_{0,0,1,0}^{(k)}(z) = \frac{\partial B(y,z,t)}{\partial z}/_{y=\frac{y_0+h_2}{2}, t=t_k} = \frac{\partial S_k(x,y,z)}{\partial z}/_{x=\sqrt{x_0 h_1}, y=\frac{y_0+h_2}{2}} = \frac{\partial P(x,z,t)}{\partial z}/_{x=\sqrt{x_0 h_1}, t=t_k};$$

$$f_{0,0,0,1}(t) = \frac{\partial B(y,z,t)}{\partial t}/_{y=\frac{y_0+h_2}{2}, z=\sqrt{z_0 h_3}} = \frac{\partial P(x,z,t)}{\partial t}/_{x=\sqrt{x_0 h_1}, z=\sqrt{z_0 h_3}} = \frac{\partial \Psi(x,y,t)}{\partial t}/_{x=\sqrt{x_0 h_1}, y=\frac{y_0+h_2}{2}};$$

$$f_{1,1,0,0}^{(k)}(x,y) = \frac{\partial^2 S_k(x,y,z)}{\partial x \partial y}/_{z=\sqrt{z_0 h_3}} = \frac{\partial^2 \Psi(x,y,t)}{\partial x \partial y}/_{t=t_k};$$

$$f_{1,0,1,0}^{(k)}(x,z) = \frac{\partial^2 S_k(x,y,z)}{\partial x \partial z}/_{y=\frac{y_0+h_2}{2}} = \frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial x \partial z}/_{t=t_k};$$

$$f_{1,0,0,1}(x,t) = \frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial x \partial t}/_{z=\sqrt{z_0 h_3}} = \frac{\partial^2 \Psi(x,y,t)}{\partial x \partial t}/_{y=\frac{y_0+h_2}{2}};$$

$$f_{0,1,1,0}^{(k)}(y,z) = \frac{\partial^2 B(y,z,t)}{\partial y \partial z}/_{t=t_k} = \frac{\partial^2 S_k(x,y,z)}{\partial y \partial z}/_{x=\sqrt{x_0 h_1}};$$

$$f_{0,1,0,1}(y,t) = \frac{\partial^2 B(y,z,t)}{\partial y \partial t}/_{z=\sqrt{z_0 h_3}} = \frac{\partial^2 \Psi(x,y,t)}{\partial y \partial t}/_{x=\sqrt{x_0 h_1}};$$

$$f_{0,0,1,1}(z,t) = \frac{\partial^2 B(y,z,t)}{\partial z \partial t}/_{y=\frac{y_0+h_2}{2}} = \frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial z \partial t}/_{x=\sqrt{x_0 h_1}};$$

$$f_{1,1,1,0}^{(k)}(x,y,z) = \frac{\partial^3 S_k(x,y,z)}{\partial x \partial y \partial z};\ f_{1,1,0,1}(x,y,t) = \frac{\partial^3 \Psi(x,y,t)}{\partial x \partial y \partial t};$$

$$f_{0,1,1,1}(y,z,t) = \frac{\partial^3 B(y,z,t)}{\partial y \partial z \partial t};\ f_{1,0,1,1}(x,z,t) = \frac{\partial^3 P(x,z,t)}{\partial x \partial z \partial t};$$

The inverse one is easily proved. In other words, if the function $u \in W_p^{(1,1,1,1)}(G)$ is a solution of problem (1), (4), then it is also a solution of problem (1), (2) for the following functions:

$$B(y,z,t) = f^{(k)}_{0,0,0,0} + \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y} f^{(k)}_{0,1,0,0}(\eta)d\eta + \int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} f^{(k)}_{0,0,1,0}(\gamma)d\gamma +$$
$$+ \int\limits_{t_k}^{t} f_{0,0,0,1}(\tau)d\tau + \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} f^{(k)}_{0,1,1,0}(\eta,\gamma)d\eta d\gamma +$$
$$+ \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{t_k}^{t} f_{0,1,0,1}(\eta,\tau)d\eta d\tau + \int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z}\int\limits_{t_k}^{t} f_{0,0,1,1}(\gamma,\tau)d\gamma d\tau + \tag{5}$$
$$+ \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z}\int\limits_{t_k}^{t} f_{0,1,1,1}(\eta,\gamma,\tau)d\eta d\gamma d\tau;$$

$$P(x,z,t) = f^{(k)}_{0,0,0,0} + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x} f^{(k)}_{1,0,0,0}(\xi)d\xi + \int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} f^{(k)}_{0,0,1,0}(\gamma)d\gamma +$$
$$+ \int\limits_{t_k}^{t} f_{0,0,0,1}(\tau)d\tau + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} f^{(k)}_{1,0,1,0}(\xi,\gamma)d\xi d\gamma + \tag{6}$$
$$+ \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{t_k}^{t} f_{1,0,0,1}(\xi,\tau)d\xi d\tau + \int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z}\int\limits_{t_k}^{t} f_{0,0,1,1}(\gamma,\tau)d\gamma d\tau + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z}\int\limits_{t_k}^{t} f_{1,0,1,1}(\xi,\gamma,\tau)d\xi d\gamma d\tau;$$

$$\Psi(x,y,t) = f^{(k)}_{0,0,0,0} + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x} f^{(k)}_{1,0,0,0}(\xi)d\xi + \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y} f^{(k)}_{0,1,0,0}(\eta)d\eta +$$
$$+ \int\limits_{t_k}^{t} f_{0,0,0,1}(\tau)d\tau + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y} f^{(k)}_{1,1,0,0}(\xi,\eta)d\xi d\eta + \tag{7}$$
$$+ \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{t_k}^{t} f_{1,0,0,1}(\xi,\tau)d\xi d\tau + \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{t_k}^{t} f_{0,1,0,1}(\eta,\tau)d\eta d\tau + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{t_k}^{t} f_{1,1,0,1}(\xi,\eta,\tau)d\xi d\eta d\tau;$$

$$S_k(x,y,z) = f^{(k)}_{0,0,0,0} + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x} f^{(k)}_{1,0,0,0}(\xi)d\xi + \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y} f^{(k)}_{0,1,0,0}(\eta)d\eta + \int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} f^{(k)}_{0,0,1,0}(\gamma)d\gamma +$$
$$+ \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y} f^{(k)}_{1,1,0,0}(\xi,\eta)d\xi d\eta + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} f^{(k)}_{1,0,1,0}(\xi,\gamma)d\xi d\gamma + \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} f^{(k)}_{0,1,1,0}(\eta,\gamma)d\eta d\gamma + \tag{8}$$
$$+ \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} f^{(k)}_{1,1,1,0}(\xi,\eta,\gamma)d\xi d\eta d\gamma.$$

Note that the functions (5)-(8) possess one important property, more exactly, for all $f^{(k)}_{i_1,i_2,i_3,i_4}$ *and* f_{i_1,i_2,i_3,i_4}, the agreement conditions (3) possessing the above-mentioned properties are fulfilled for them automatically. Therefore, equalities (5)-(8) may be considered as a general kind of all the functions

$B(y,z,t)$, $P(x,z,t)$, $\Psi(x,y,t)$ and $S_k(x,y,z)$ satisfying the agreement conditions (3).

We have thereby proved the following assertion.

Theorem . The 4D combined boundary problems of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type of the form (1), (2) and the non-classical form (1), (4) are equivalent.

Note that the 4D combined boundary problem of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type in the non-classical treatment (1), (4) can be studied with the use of multi-point integral representations of special form for the functions $u \in W_p^{(1,1,1,1)}(G)$[14-21],

$$u(x,y,z,t) = u(\sqrt{x_0h_1}, \frac{y_0+h_2}{2}, \sqrt{z_0h_3}, t_k) + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x} u_\xi(\xi, \frac{y_0+h_2}{2}, \sqrt{z_0h_3}, t_k)d\xi +$$

$$+ \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y} u_\eta(\sqrt{x_0h_1}, \eta, \sqrt{z_0h_3}, t_k)d\eta + \int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} u_\gamma(\sqrt{x_0h_1}, \frac{y_0+h_2}{2}, \gamma, t_k)d\gamma +$$

$$+ \int\limits_{t_k}^{t} u_\tau(\sqrt{x_0h_1}, \frac{y_0+h_2}{2}, \sqrt{z_0h_3}, \tau)d\tau + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y} u_{\xi\eta}(\xi, \eta, \sqrt{z_0h_3}, t_k)d\xi d\eta +$$

$$+ \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} u_{\xi\gamma}(\xi, \frac{y_0+h_2}{2}, \gamma, t_k)d\xi d\gamma + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{t_k}^{t} u_{\xi\tau}(\xi, \frac{y_0+h_2}{2}, \sqrt{z_0h_3}, \tau)d\xi d\tau +$$

$$+ \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} u_{\eta\gamma}(\sqrt{x_0h_1}, \eta, \gamma, t_k)d\eta d\gamma + \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{t_k}^{t} u_{\eta\tau}(\sqrt{x_0h_1}, \eta, \sqrt{z_0h_3}, \tau)d\eta d\tau +$$

$$+ \int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z}\int\limits_{t_k}^{t} u_{\gamma\tau}(\sqrt{x_0h_1}, \frac{y_0+h_2}{2}, \gamma, \tau)d\gamma d\tau + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z} u_{\xi\eta\gamma}(\xi, \eta, \gamma, t_k)d\xi d\eta d\gamma +$$

$$+ \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{t_k}^{t} u_{\xi\eta\tau}(\xi, \eta, \sqrt{z_0h_3}, \tau)d\xi d\eta d\tau + \int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z}\int\limits_{t_k}^{t} u_{\eta\gamma\tau}(\sqrt{x_0h_1}, \eta, \gamma, \tau)d\eta d\gamma d\tau +$$

$$+ \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z}\int\limits_{t_k}^{t} u_{\xi\gamma\tau}(\xi, \frac{y_0+h_2}{2}, \gamma, \tau)d\xi d\gamma d\tau + \int\limits_{\sqrt{x_0h_1}}^{x}\int\limits_{\frac{y_0+h_2}{2}}^{y}\int\limits_{\sqrt{z_0h_3}}^{z}\int\limits_{t_k}^{t} u_{\xi\eta\gamma\tau}(\xi, \eta, \gamma, \tau)d\xi d\eta d\gamma d\tau.$$

4. Result

So, the classical form 4D combined boundary problems of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type (1), (2) and in non-classical treatment (1), (4) are equivalent in the general case. However, the 4D combined boundary problem of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type in non-classical statement (1), (4) is more natural by statement than problem (1), (2). This is connected with the fact that in statement of problem (1), (4) the right sides of boundary conditions don't require additional conditions of agreement type. Note that some boundary-value problems in non-classical treatments for hyperbolic and also pseudoparabolic equations and their applications to optimal control theory were investigated in the author's papers [22-35].

5. Discussion and Conclusions

In this paper a non-classical type 4D combined boundary problem of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type is substantiated for a 4D Bianchi equation with non-smooth coefficients and with a fourth-order dominating derivative. Classic 4D combined boundary of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type conditions are reduced to non-classic 4D combined boundary of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type conditions by means of integral representations. Such statement of the problem has several advantages:

1) No additional agreement conditions are required in this statement;

2) One can consider this statement as a 4D combined boundary problem of 2D in the geometrical middle -1D in the middle -1D multi-point type formulated in terms of traces in the S.L. Sobolev isotropic space $W_p^{(1,1,1,1)}(G)$;

3) In this statement the considered 4D Bianchi equation is a generalization of many model differential equations of some processes (e.g. 3D and 4D telegraph equation, 3D Bianchi equation, 3D and 4D wave equations and etc.).

REFERENCES

[1] Mamedov, I.G., Abdullayeva, A.J. Integral representation of solution of middle boundary problem for one integro-differential equation 3D Bianchi with non-smooth coefficients // “Operators, Functions, and Systems of Mathematical Physics” conference, -Baku: Khazar University, -10-14 June, -2019, -p.71-72.

[2] Məmmədov, İ.Q., Abdullayeva, A.C. Bir anizotrop Sobolev fəzasında funksiyaların inteqral göstərilişi və onun tətbiqi barədə // “Riyaziyyatın fundamental problemləri və intellektual texnologiyaların təhsildə tətbiqi” II Respublika elmi konfransı, -Sumqayıt: -15-16 dekabr -2022, -s.57-58.

[3] Abdullayeva, A.J. Fundamental solution of the boundary value problem for a hyperbolic integro-differential equation of the 3D Bianchi type // -Baku: Proceedings of the Institute of Applied Mathematics, -2022. v.11, issue 2, -p.159-190,

[4] Mamedov, I.G., Abdullayeva, A.J. One 3D in the Geometrical Middle Problem in the Non-classical Treatment for one 3D Bianchi Integro-differential Equation with Non-smooth Coefficients // -Baku: Caspian Journal of Applied Mathematics, -2018. v. 6, -pp. 73-81.

[5] Məmmədov, İ.Q., Abdullayeva, A.C. Azərbaycanda hərbi sənaye kompleksinin və hərbi hissələrdə tikilən binaların seysmik dayanıqlıq məsələlərinin riyazi modelləşdirilməsi barədə // Milli Müdafiə Universitetinin Hərbi Elmi Tədqiqat İnstitutu, Müasir Radotexniki Silahlar Respublika elmi-praktik konfransının materialları , -12 13 mart, -2024, -s.256-259.

Forecasting Transport Service Demand under Dynamic Conditions: A Scenario-Based Approach

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.074

Viktoriia Nykonchuk
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua

Abstract — **In transport systems theory, forecasting the demand for transport services is an essential task addressed by classical methods such as gravity and regression models, discrete choice models, and time series analysis. These approaches enable the estimation of passenger flows and the assessment of socio-economic factors. However, the dynamic development of the market and crisis situations necessitate more adaptive approaches, such as scenario modeling supported by machine learning algorithms and intelligent analytics.**

The aim of this study is to test a scenario-based approach to forecasting transport service demand under dynamic external conditions.

The paper proposes a modeling algorithm, conducts numerical calculations, and analyzes key transport demand indicators (average mobility, average travel time, travel losses, modal split). The results demonstrate high sensitivity of demand to crises of various origins and provide practical recommendations for optimizing the route network, enhancing the resilience, and improving the adaptability of the transport system.

***Keywords*— demand forecasting, transport services, scenario modeling, transport planning**

I. Introduction

Forecasting the demand for transport services is a key task of transport planning, as it directly affects the efficiency of transport systems. Traditional methods—gravity and regression models, discrete choice models, and time series analysis—form the basis of classical transport modeling [1,2]. These approaches allow for the estimation of passenger flows, the examination of demand factors, and the construction of baseline forecasts.

However, the dynamic development of the market, crisis situations, and socio-economic changes require more flexible tools capable of adapting to uncertainty. Modern digital technologies, particularly machine learning algorithms and intelligent analytics, create the prerequisites for applying scenario-based modeling, which improves forecast accuracy and enhances the adaptability of transport systems.

II. Problem Statement

Existing methods of demand forecasting have several limitations:

Gravity and regression models insufficiently account for spatio-temporal and socio-economic factors [4];

Discrete choice models require large volumes of high-quality data [2];

Time series and stochastic approaches are ineffective under conditions of rapid environmental change [3].

This gives rise to the task of developing an integrated methodology for demand forecasting that combines classical transport models with adaptive data analysis tools; enables the modeling of various development scenarios (economic recession, infrastructure failures, pandemics, tariff changes); and provides decision-makers with an instrument for risk assessment and decision-making in route network organization.

The aim of this study is to test a scenario-based approach to forecasting the demand for transport services under dynamic external conditions.

To achieve this goal, the study proposes:

– the integration of classical transport models with modern data analysis tools;

– modeling of key crisis scenarios (economic recession, infrastructure failures, tariff shocks, pandemic);

– evaluation of the impact of these scenarios on population mobility, average travel time, trip losses, and modal split;

– development of practical recommendations to improve the resilience and flexibility of transport systems.

III. Research Methods and Modeling Framework

To forecast the demand for transport services under dynamic conditions, this study proposes a modeling algorithm that integrates classical transport models with adaptive data analysis tools, thereby enabling the simulation of diverse crisis scenarios. The algorithm is

designed to address the limitations of conventional forecasting techniques by incorporating flexibility and resilience into the modeling process. In particular, it facilitates the examination of how socio-economic shocks, infrastructural disruptions, tariff fluctuations, and pandemic-related constraints may influence transport demand patterns.

On the basis of the proposed framework, numerical experiments were conducted to model key indicators of transport demand across multiple developmental scenarios. These indicators include average mobility, mean travel time, trip losses, and modal split. The simulation results not only demonstrate the sensitivity of transport demand to external shocks but also provide insights that can inform the optimization of route networks and the enhancement of system adaptability under conditions of uncertainty.

The modeling algorithm is presented in Fig. 1.

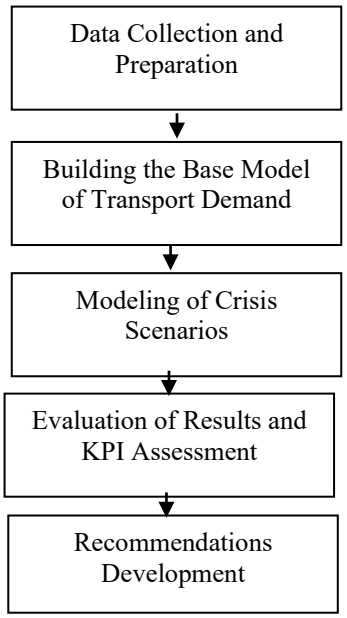


Fig. 1. Algorithm for Scenario Modeling of Transport Demand

This allows for the assessment of how economic, infrastructural, and social changes affect average population mobility, travel time, trip losses, and modal split.

The following section presents the simulation results for the baseline scenario and four crisis scenarios, as well as a comparative analysis of key performance indicators (KPIs).

IV. Results

The study utilized data from a sociological survey (1,107 respondents) and traffic counts at 35 control points across the city [6,7]. Baseline OD matrices were constructed, accounting for temporal demand characteristics (morning and evening peaks), modal split, and socio-economic factors [5].

5.1. Scenario "Base" (BS).

Under stable conditions, the average level of population mobility is 2.2 trips per day per capita, as confirmed by survey data. The trip distribution exhibits two pronounced peak periods: the morning peak (07:00–09:30) accounts for 44% of trips, while the evening peak (15:30–19:00) accounts for 26%. The average travel time is 27–28 minutes. The modal split is dominated by minibuses (≈49%) and trolleybuses (≈21%), with the remainder distributed among buses, private cars, and walking.

The dynamics of changes in average mobility across different scenarios are shown in Fig. 2.

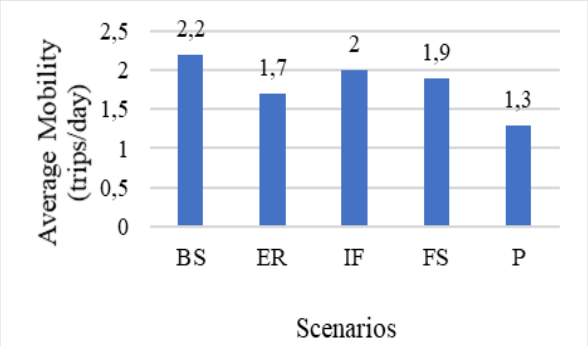


Fig. 2. Scenario-Based Changes in Average Mobility

5.2. Scenario "Economic Recession" (ER).

A decline in household income and purchasing power leads to a reduction in demand for public transport. It is estimated that the number of trips in low-income households decreases by 20–30%, reducing average mobility from 2.2 to approximately 1.7 trips per person per day. The share of walking trips increases (+5–7 percentage points), while the use of minibuses and taxis decreases.

5.3. Scenario "Infrastructure Failure" (IF).

Accidents, critical damage, and subsequent repairs of transport facilities (e.g., a bridge or a main line) result in local congestion on adjacent routes (up to +30% passengers during peak hours). Average travel time increases to 35–40 minutes (Fig. 3), and the share of lost trips reaches 10–15% within the affected area.

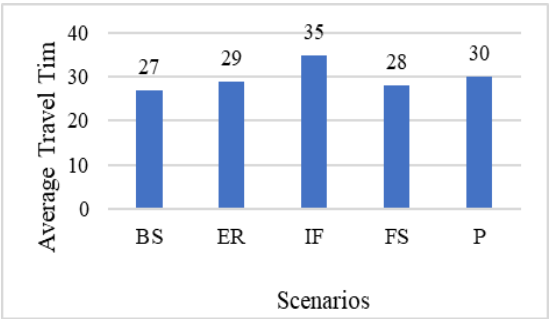


Fig. 3. Impact of Infrastructure Failures on Average Travel Time

5.4. Scenario "Fare Shock" (FS).

A sharp increase in fare prices by 30–50% without corresponding improvements in service quality reduces demand for public transport by 10–20%. Low-income passengers are the most sensitive to such changes. The share of walking and cycling trips increases (up to 18%),

while minibuses lose up to 9 percentage points in the modal split structure (Fig. 4).

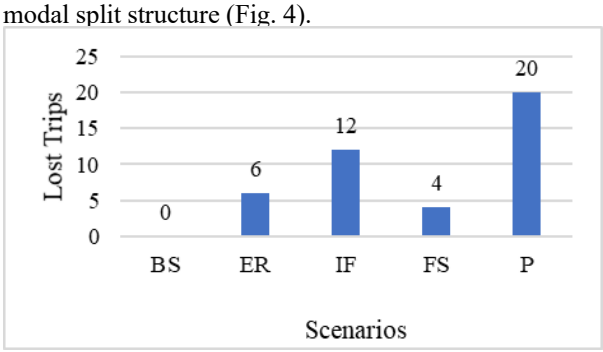


Fig. 4. Impact of Fare Changes on Modal Split

The change in modal split under fare adjustments demonstrates a high passenger sensitivity to travel costs and underscores the need for adaptive fare regulation and the maintenance of accessibility for socially vulnerable population groups.

5.5. Scenario "Pandemic" (P).

The spread of a pandemic led to a decrease in mobility of approximately 40%, with the average number of trips declining to 1.3 per person per day. Additionally, 68% of respondents reported being unable to board due to overcrowding and capacity restrictions. Average travel time increased to 30–32 minutes, and the modal split shifted toward walking and cycling trips. This created significant challenges in ensuring transport accessibility.

5.6. Comparative Analysis of KPIs

The aggregated key performance indicators (KPIs) of transport demand across scenarios are presented in Table 1.

Table 1

Comparative Analysis of KPIs

Indicator	*BS*	*ER*	*IF*	*FS*	*P*
Average Mobility (trips/day)	2,2	1,7 (-23%)	2,0 (-9%)	1,9 (-4%)	1,3 (-0%)
Average Travel Tim	27–28 min	29–30 min	35–40 min	28–30 min	30–32 min
Lost Trips	≈0%	5–7%	10–15%	3–5%	до 20%
Share of Walking Trips	12%	17%	14%	18%	22%
Share of Minibus Trip	49%	43%	46%	40%	38%

As shown in the table, each scenario exhibits specific changes in key transport demand indicators. Economic recession reduces average mobility by 20–30% among low-income population groups. Infrastructure failures lead to an increase in travel time to 35–40 minutes and trip losses of up to 15%. Fare shocks decrease demand by 10–20%, whereas the pandemic causes the largest reduction in mobility and shifts the modal split toward walking and cycling. These findings provide the basis for further discussion of practical implications and recommendations for adaptive management of the transport system.

5.7. Discussion.

The obtained results demonstrate a high sensitivity of public transport demand to crises of various types. For transport planning, this implies the need for: flexible adjustments of schedules and routes during peak hours; implementation of reserve capacities to respond to capacity restrictions; promotion of alternative mobility modes (bicycles, micromobility) as compensatory mechanisms; and the use of scenario-based forecasting as a tool for risk assessment and timely managerial decision-making.

CONCLUSIONS

Conducting scenario-based modeling of transport service demand under dynamic conditions is a necessary prerequisite for ensuring the efficiency, resilience, and adaptability of urban transport systems. The integration of classical transport models with modern data analysis methods allows for the assessment of the impacts of various crisis scenarios—such as economic recession, infrastructure failures, fare shocks, and pandemics—on average population mobility, travel time, trip losses, and modal split.

Thus, the application of a scenario-based approach enhances the reliability of forecasts, enables risk assessment, and supports the development of practical recommendations to improve the resilience and adaptability of transport systems

REFERENCES

[1] Moreau, A., Côme, E., & Oukhellou, L. (2024). Modeling COVID-19 impact on Paris metro demand with regression mixtures. arXiv preprint arXiv:2402.12392. https://arxiv.org/abs/2402.12392

[2] Verroen, E., & Jansen, G. (1991). The Scenario Explorer for passenger transport. https://consensus.app/papers/the-scenario-explorer-for-passenger-transport-verroen-jansen/89f5ba1404cd500cb418342180241603/?utm_source=chatgpt

[3] Stephenson, J., & Zheng, L. (2013). National long-term land transport demand model. https://consensus.app/papers/national-longterm-land-transport-demand-model-stephenson-zheng/a985e03b8977591ea259d89b942da4de/?utm_source=chatgpt

[4] Davidich, Y. O., Ivanov, S. M., & Kuznetsova, N. P. (2019). Study of the attraction function of residents for assessing demand for transport services in cities. Urban Utilities, (4), 56–61. http://k-tsl.com

[5] Fornalchik, Y. U. (2020). Transport flow modeling: A textbook. Lviv: Novyi Svit – 2000. http://mybook.biz.ua

[6] Ponkratov, D., Kopytkov, D., Davidich, Y., Kush, Y., & Nykonchuk, V. (2025). An estimation of the public transit quality of service based on travel fatigue modeling approach. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1499(1), 1–15. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1499/1/012069

[7] Nykonchuk, V. M., Krystopchuk, M. E., Khitrov, I. O., et al. (2024). Theory and practice of development of transport systems and transport infrastructure objects [Monograph]. Lutsk: Vezha-Druk.

MCIT Modeling, control & information technologies

Improving Predictive Accuracy in Surrogate Modeling of Plate Deflection through Physics-Informed Feature Engineering

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.075

Roman Onatskyi
PhD Student: Dept. of Mathematical Modelling and Intelligent Computing in Engineering
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute
Kharkiv, Ukraine
roman.onatskyi@infiz.khpi.edu.ua

Serhii Misiura
Associate Professor of the Department of Mathematical Modeling and Intelligent Computing in Engineering,
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"
Senior Researcher of the Department of Vibration and Thermostability Studies, Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems of NAS of Ukraine
Kharkiv, Ukraine
serhii.misiura@khpi.edu.ua

Abstract — **This work proposes a physics-informed feature engineering approach to improve the predictive accuracy of surrogate models for problems in solid mechanics. The prediction of the maximum deflection of a thin square plate under a uniform load is considered as a case study. A dataset of 5000 samples was generated using the finite element method in Ansys Mechanical. This was followed by a physical validation based on the theory of small deflections, and invalid samples were discarded. A random forest regressor algorithm was used for the surrogate model, and its hyperparameters were optimized using RandomizedSearchCV. Two input feature architectures were compared: a baseline architecture (using fundamental physical parameters) and a physics-informed architecture (using complex engineering features, specifically relative flexibility K1 and cylindrical rigidity D). The results showed a significant increase in accuracy when using physics-informed features compared to the baseline approach. An analysis of feature importance confirmed the dominant role of K1 and the load p, which is fully consistent with theoretical mechanics. The obtained results demonstrate that feature engineering based on physical principles improves both the accuracy and interpretability of machine learning surrogate models.**

Keywords — finite element method; surrogate models; feature engineering; random forest; machine learning; plate deflection

I. Introduction

Modern design and analysis of engineering structures, especially thin plates and shells, are closely linked to the use of numerical methods like the Finite Element Method (FEM) [1, 2]. Despite their high accuracy, these methods are computationally expensive. This makes them difficult to use for optimization or uncertainty analysis tasks that require hundreds or thousands of simulations.

An effective alternative is the use of surrogate models based on machine learning [3,4]. Such models, trained on a limited amount of data from FEM simulations, can predict the system's behavior almost instantly with high accuracy. However, the quality of a surrogate model critically depends on two factors: the strategy for generating the training dataset and the architecture of the input features fed into the model.

This work investigates the influence of input feature architecture on the accuracy of a surrogate model, using the problem of predicting the maximum deflection of a thin square plate under a uniform load. The study aims to compare the effectiveness of two input data architectures: a baseline one, consisting of fundamental physical parameters, and a physics-informed one, which uses complex engineering features.

II. Problem Formulation

A. Data Generation and Preparation

To train the model, an initial dataset of 5000 points was generated using random uniform sampling. The input parameters were varied within the following ranges: plate size, a [0.05, 1.5] m; thickness, t [0.005, 0.01] m; Young's modulus, E [$1\cdot10^{10}$, $2\cdot10^{11}$] Pa; Poisson's ratio, ν [0.20, 0.45]; and load, p [$1\cdot10^{3}$, $1\cdot10^{5}$] Pa.

The target variable was the maximum plate deflection w, m.

The deflection value was obtained as a result of an FEM simulation in the Ansys Mechanical CAE system. The modeling and calculation were performed using the APDL (Ansys Parametric Design Language) scripting language [8].

The algorithm for construction and calculation is based on the same principles that were described in detail in the paper [6].

Since a random combination of parameters can lead to results that are outside the applicability of the small

deflection theory, a physical validation and data filtering were performed according to the criteria of the Kirchhoff-Love [5] theory of small deflections. That is, $0.0001 < w/t < 0.5$, where 0.0001 is the relative limit of deflection measurability.

After filtering, the final dataset consisted of 2249 physically valid samples, or 44.98% of the initial volume. These samples were used for further training and testing.

B. Surrogate Model

The random forest regressor, an ensemble algorithm from the Python package sklearn.ensemble [7], was chosen as the surrogate model. This choice was made due to its high efficiency on tabular data, resistance to overfitting, and ability to capture complex non-linear dependencies without the need for data scaling.

For better visualization and interpretation of the results, the dataset was converted to the following units before machine learning: linear parameters (a, t, w) to mm, and Young's modulus and load values to MPa.

The regressor model was configured with the following hyperparameters to ensure an optimal balance between prediction accuracy and computational efficiency: the number of trees in the forest was set to 98; the maximum depth of each tree was limited to 11 levels; all available features were used for each split; the minimum number of samples for an internal node split was set to 5; and the minimum number of samples in a leaf node was set to 3.

To select the optimal hyperparameters for the regressor model, the RandomizedSearchCV method from the scikit-learn library [7] was used, which performs stochastic optimization in the hyperparameter space combined with cross-validation.

The optimization process included defining parameter ranges for key hyperparameters, applying 5-fold cross-validation, optimizing for the negative mean squared error metric, and limiting the process to 50 iterations. This approach allowed for a systematic exploration of the hyperparameter space to select the optimal settings for the model.

C. Input Feature Architectures

To study the influence of the input feature architecture on the quality of the surrogate model, two different approaches to forming the input data vector were considered.

Each architecture was designed considering the physical principles of the plate deflection prediction problem and provided a different level of integration of engineering knowledge into the machine learning process.

1) Baseline Architecture.

The baseline architecture used a set of fundamental physical parameters that directly characterize the plate's geometry, material properties, and loading. The input vector consisted of five parameters: [a (mm), t (mm), E (MPa), v, p (MPa)]. This approach allowed the model to independently learn the complex non-linear relationships between the input parameters and the target variable w (mm) based solely on the patterns in the training data.

2) Physics-informed Architecture.

This architecture was based on an engineering analysis of physical dependencies and the construction of corresponding features. Based on the fundamental parameters, complex engineering features were created that integrate several basic quantities into single, physically meaningful characteristics:

- **K1**: the relative flexibility of the plate, defined as K1 = a/t, which characterizes the geometric flexibility of the structure.
- **D**: the cylindrical bending rigidity, defined as (1), which integrates the influence of material properties (E, ν) and geometry (t) on bending resistance.
- **p**: the intensity of the uniform load (MPa).

$$D = E \cdot t^3 / 12 \cdot (1 - \nu^2) \quad (1)$$

This approach explicitly provided the model with information about the physical mechanisms of deformation, particularly the non-linear dependence of deflection on thickness, which contributed to more effective learning.

D. Quality Assessment

For each architecture, the model was trained on 80% of the data and tested on the remaining 20%. The quality was evaluated using the coefficient of determination (R^2) and the mean squared error (MSE).

III. Results

Training and testing the models on the filtered, physically correct data using the two feature architectures showed a significant difference in prediction quality.

The summary table of results for the two architectures is shown in Table 1. The model accuracy comparison for the "Baseline" architecture is shown in Fig. 1, and for the "Physics-informed" architecture in Fig. 2.

TABLE I. Comparison of Prediction Quality for the Two Proposed Architectures

Feature Architecture	R^2	MSE
Baseline	0.646	3.223
Physics-informed	0.896	0.946

A. Baseline Architecture

The model trained on fundamental parameters showed satisfactory but limited accuracy: $R^2 \approx 0.646$, MSE ≈ 3.223, see Fig. 1 for more details. The analysis revealed that the model captured general trends but had a significant scatter of predictions, especially for large deflection values. This indicates that independently learning the complex non-linear dependence of deflection on thickness is a difficult task for the model.

B. Physics-informed Architecture

After switching to engineering features, the model's quality significantly increased: $R^2 \approx 0.896$, MSE ≈

0.946, see Fig. 2 for more details. The feature importance analysis for the improved model showed that the largest contributions to the prediction were made by physically significant parameters: K1 (relative flexibility, ~59%) and p (load, ~24%), which fully aligns with theoretical mechanics. The introduction of the D parameter allowed the model to effectively account for the combined influence of Young's modulus and thickness.

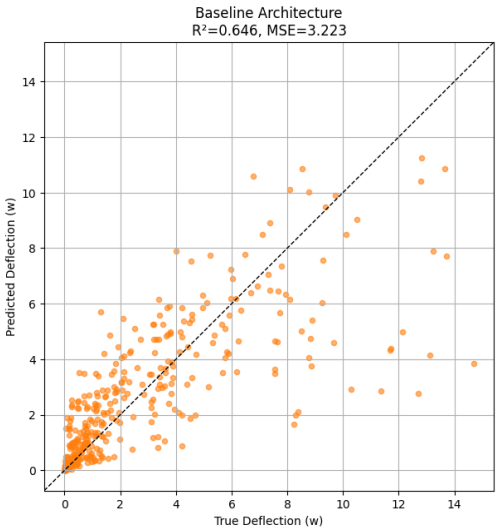


Figure 1. Comparison of model accuracy for the "Baseline"

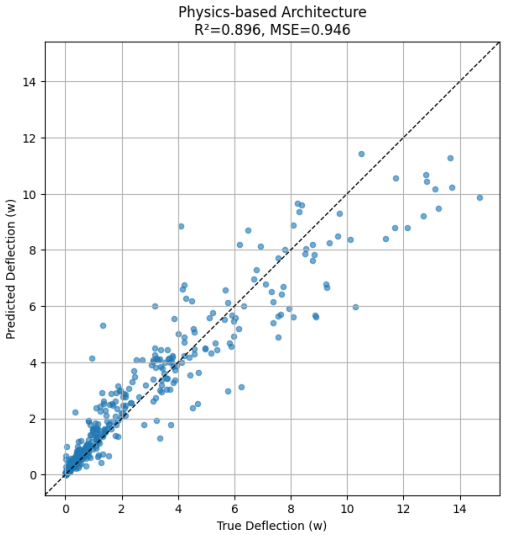


Figure 2. Comparison of model accuracy for the "Physics-informed"

This confirms that the model learned to make decisions based on the same complex criteria used by a design engineer.

IV. Conclusions

The conducted research demonstrates that the architecture of input features is a critically important factor when building surrogate models for problems in solid mechanics. The transition from a set of basic physical parameters to physics-informed features, such as relative flexibility (K1) and cylindrical rigidity (D), significantly increases the prediction accuracy of a model based on the random forest regressor algorithm. Feature engineering not only improves quality metrics but also enhances the model's interpretability, as it makes decisions based on the same physical principles used in classical theoretical mechanics, and generally improves its ability to generalize.

References

[1] K. J. Bathe, Finite element procedures, 2nd ed. Watertown, MA: Klaus-Jurgen Bathe, 2014, 1037 p.

[2] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and S. Govindjee, The finite element method: its basis and fundamentals, 8th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2024, 650 p.

[3] R. A. Babudzhan, O. O. Vodka, and M. I. Shapovalova, "Application of computational intelligence methods for the heterogeneous material stress state evaluation," Herald of Advanced Information Technology, vol. 5, no. 3, pp. 198–209, 2022, doi: 10.15276/hait.05.2022.15.

[4] W. Zhang, Z. Zhang, C. Wu, and A. Goh, "Assessment of basal heave stability for braced excavations in anisotropic clay using extreme gradient boosting and random forest regression," Underground Space, vol. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1016/j.undsp.2020.03.001.

[5] S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, Theory of plates and shells, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1989, 580 p. (McGraw-Hill International Series).

[6] R. Onatskiy and S. Misiura, "Development of a methodology for rapid strength assessment of dented vessels using AI on the example of dataset formation for plates under pressure," Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Dynamics and Strength of Machines, no. 1, pp. 60–68, 2025. doi: 10.20998/2078-9130.2025.1.331577.

[7] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and É. Duchesnay, "Scikit-learn: Machine learning in Python," J. Mach. Learn. Res., vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.

[8] M. K. Thompson and J. M. Thompson, ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis, 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. doi: 10.1016/B978-0-12-812981-4.00001-0.

MCIT Modeling, control & information technologies

Monitoring of rolling bearing with inner race fault using parameters of vibration birhythmic stochastic recurrence

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.076

Roman Pelypets
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
pelypets.ri@gmial.com

Roman Yuzefovych
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
Karpenko Physico-mechanical Institute
of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
roman.yuzefovych@gmail.com

Ihor Javorskyj
Karpenko Physico-mechanical Institute
of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
University of Science and Technology,
Bydgoszcz, Poland
javor@pbs.edu.pl

Oleh Lychak
Karpenko Physico-mechanical Institute
of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
olehlychak2003@yahoo.com

Roman Sliepko
Karpenko Physico-mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
roman.slyepko@gmail.com

Abstract— **An analysis of the covariance and spectral structure of the Hilbert transform of biperiodically non-stationary random processes, which are a model of signals with double rhythmicity, are provided. The obtained relations for the cross-covariance and cross-spectral characteristics of the signal and its Hilbert transform.**

Keywords — bi-periodically non-stationary random process, Hilbert transform, covariance and spectral components, vibration, hidden periodicities.

I. Introduction

The analysis of vibrations origin from the damaged rotating machines on the basis of their model in the form of periodically non-stationary random processes (PNRP) enables to detect the mechanism faults on early stages of their development as well as to determine the parameters which characterize faults [1, 3, 4]. The powers of the resonance oscillations increase when the shaft passes through a fault zone. As the result of recurrent passings, the vibration signal acquires the properties of the birhythmical recurrence. The shaft rotation frequency and ball pass frequency on internal ring (BPFI) can be considered as the signal basic frequencies. In the present paper, we prove that on the basis signal model, in the form of the biperiodically non-stationary processes (BPNRP), we can discover a new its regularities, which describe the properties of the joint modulation deterministic and stochastic components for two recurrences. It is also to substantiate the new bearing condition indicators for its monitoring and the improvement of efficiency for the fault detection.

II. Covariance and Spectral Properties of BPNRP.

The mean function of a BPNRP $m_\xi(t) = E\xi(t)$ and its covariance function $b_\xi(t,u) = E\overset{\circ}{\xi}(t)\overset{\circ}{\xi}(t+u)$, $\overset{\circ}{\xi}(t) = \xi(t) - m_\xi(t)$, where E is the mathematical expectation operator, are biperiodic functions of time and can be represented by Fourier series:

$$m_\xi(t) = \sum_{k,l\in Z} m_{kl}^{(\xi)} e^{i\omega_{kl}t} = m_{00}^{(\xi)} + \sum_{k=0}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty}\left(m_{kl}^{c}\cos\omega_{kl}t + m_{kl}^{s}\sin\omega_{kl}t\right) + \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=0}^{\infty}\left(m_{k,-l}^{c}\cos\omega_{k,-l}t + m_{k,-l}^{s}\sin\omega_{k,-l}t\right), \quad (1)$$

$$b_\xi(t,u) = \sum_{k,l\in Z} B_{kl}^{(\xi)}(u) e^{i\omega_{kl}t} = B_{00}^{(\xi)}(u) + \sum_{k=0}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty}\left[B_{kl}^{c}(u)\cos\omega_{kl}t + B_{kl}^{s}(u)\sin\omega_{kl}t\right] + \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=0}^{\infty}\left[B_{k,-l}^{c}(u)\cos\omega_{k,-l}t + B_{k,-l}^{s}(u)\sin\omega_{k,-l}t\right]. \quad (2)$$

Here Z is the set of integers, $m_{kl}^{(\xi)}=\frac{1}{2}\left(m_{kl}^{c}-im_{kl}^{s}\right)$ and

$$B_{kl}^{(\xi)}(u)=\frac{1}{2}\left[B_{kl}^{c}(u)-iB_{kl}^{s}(u)\right],$$

$m_{-k,-l}^{(\xi)}=\overline{m}_{kl}^{(\xi)}$, $B_{-k,-l}^{(\xi)}(u)=\overline{B}_{kl}^{(\xi)}(u)$, where "‾" – denotes conjugation, $\omega_{kl}=k\frac{2\pi}{P_1}+l\frac{2\pi}{P_2}$, P_1 and P_2 are periods. The process $\xi(t)$ can be represented in the form of a stochastic series:

$$\xi(t)=\sum_{k,l\in\mathsf{Z}}\xi_{kl}(t)e^{iw_{kl}t}, \qquad (3)$$

where $\xi_{kl}(t)=\frac{1}{2}\left[\xi_{kl}^{c}(t)-\xi_{kl}^{s}(t)\right]$, $\xi_{-k,-l}(t)=\overline{\xi}_{kl}(t)$, are jointly stationary random processes.

III. Hilbert transform

Consider that the random process $\xi(t)$ (3) has a zeroth constant component $m_{00}=0$. Then, there exists the Hilbert transform

$$\eta(t)=H\{\xi(t)\}=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\xi(\tau)}{t-\tau}d\tau, \qquad (4)$$

and for its mathematical expectation, we have:

$$m_{\eta}(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{m_{\xi}(t)}{t-\tau}d\tau.$$

After substituting into this formula series (1), we obtain:

$$m_{\eta}(t)=\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty}\left(m_{kl}^{c}\sin\omega_{kl}t-m_{kl}^{s}\cos\omega_{kl}t\right)+$$
$$+\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=0}^{\infty}\left(m_{k,-l}^{c}\sin\omega_{k,-l}t-m_{k,-l}^{s}\cos\omega_{k,-l}t\right).$$

Here it is taken into account that the Hilbert transform shifts the phases of the harmonics of the mathematical expectation (1) by $-\frac{\pi}{2}$. The mathematical expectation of the analytic signal $\zeta(t)=\xi(t)+i\eta(t)$ then has the form:

$$m_{\zeta}(t)=2\left[\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty}m_{kl}e^{i\omega_{kl}t}+\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=0}^{\infty}m_{k,-l}e^{i\omega_{k,-l}t}\right].$$

A BPNRP $\xi(t)$, whose covariance function is represented by the series (2), and its Hilbert transform (4) are jointly biperiodically non-stationary processes, and their auto- and cross-covariance components are related by the ratios:

$$B_{kl}^{(\xi\eta)}(u)=\int_{-\infty}^{\infty}h(u-\tau)B_{kl}^{(\xi)}(\tau)d\tau,$$

$$B_{kl}^{(\eta\xi)}(u)=-\int_{-\infty}^{\infty}h(u-\tau)B_{kl}^{(\eta)}(\tau)d\tau,$$

$$B_{kl}^{(\xi)}(u)=-\int_{-\infty}^{\infty}h(u-\tau)B_{kl}^{(\xi\eta)}(\tau)d\tau,$$

$$B_{kl}^{(\eta)}(u)=\int_{-\infty}^{\infty}h(u-\tau)B_{kl}^{(\eta\xi)}(\tau)d\tau,$$

where $h(\tau)=(\pi\tau)^{-1}$ is the impulse response of the Hilbert transform, which means that the covariance components $B_{kl}^{(\xi)}(u)$ and $B_{kl}^{(\xi\eta)}(u)$, as well as $B_{kl}^{(\eta\xi)}(u)$ and $B_{kl}^{(\eta)}(u)$, are Hilbert pairs.

The zeroth covariance component of a BPNRP signal and its Hilbert transform are equal, and their zeroth cross-covariance components differ only by sign, they are odd functions and are determined by the formula:

$$B_{00}^{(\xi\eta)}(u)=2\int_{0}^{\infty}f_{00}^{(\xi)}(\omega)\sin\omega u d\omega.$$

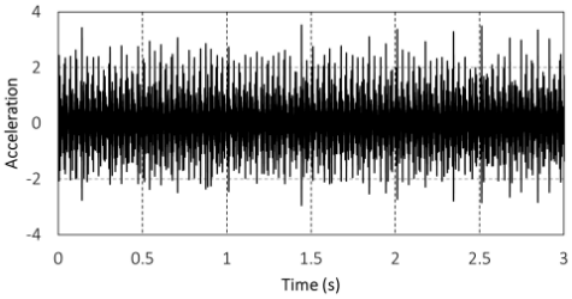
The cross-covariance function of a BPNRP signal and its Hilbert transform, as well as the autocovariance function of the latter, vary bi-periodically with time, and their Fourier coefficients are determined by the formulas:

$$B_{kl}^{(\eta)}(u)=\int_{-\infty}^{0}f_{kl}^{(\xi)}(\omega)e^{i\omega u}d\omega-\int_{0}^{\omega_{kl}}f_{kl}^{(\xi)}(\omega)e^{i\omega u}d\omega$$
$$+\int_{\omega_{kl}}^{\infty}f_{kl}^{(\xi)}(\omega)e^{i\omega u}d\omega,$$

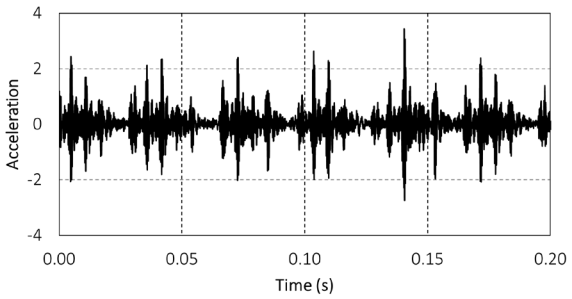
$$B_{kl}^{(\xi\eta)}(u)=i\int_{0}^{\infty}\left[f_{kl}^{(\xi)}(\omega+\omega_{kl})e^{-i\omega u}-f_{kl}^{(\xi)}(\omega)e^{i\omega u}\right]d\omega.$$

IV. Time series BPNRP analysis

The segment of the recorded vibration signal realization from bearing with fault is presented in Fig. 1. The width of the inner race fault is 0.56 mm.



(a)

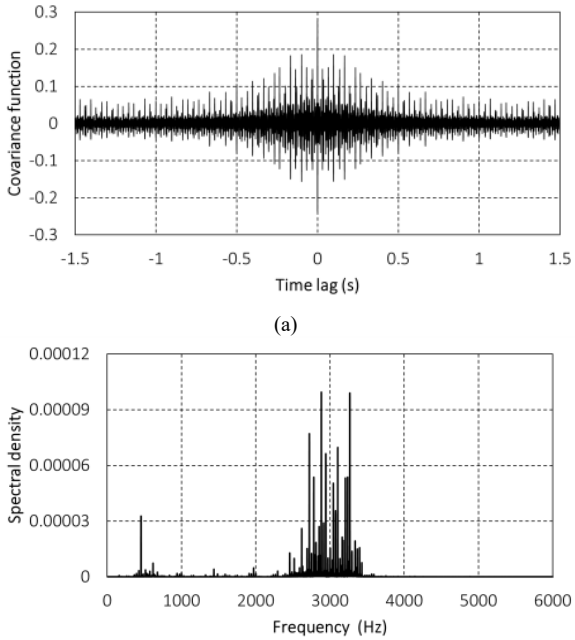


(b)

Fig. 1. Segment of vibration realization for diferent scales (a,b)

It can be seen in Fig. 2 that the vibrations have a form of the oscillatory groups following one after other

with the time intervals that are close to shaft rotation period. The covariance function has the form undamped oscillatory groups. For time lag values outside 1.5s this graph turns into undamped oscillations. The spectral density estimator has the comb-form with different peak heights.

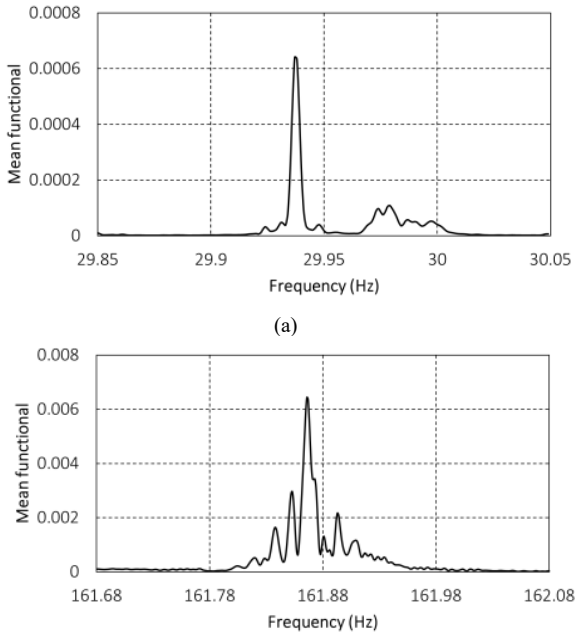


(a)

(b)

Fig. 2. Estimator of raw signal covariance function(a) and spectral density(b)

As it can be seen in Fig. 3, the graph has clear-cut maximum at point 29.937 Hz, which we take as the estimator of the low basic frequency and at point 161.862 Hz, which we take as the high frequency. [1]



(a)

(b)

Fig. 3. Dependence of variance functionals on test frequencies(a, b)

Based on the found basic frequencies we can calculate the following combination harmonics in Table 1.

Table 1. Frequencies of mean combination harmonics (Hz)

l \ k	3	4	...	17	18	19	20
-1	455.649	617.511	...	2721.717	2883.579	3045.441	3207.303
0	485.586	647.448	...	2751.654	2913.515	3075.378	3237.240
1	515.523	677.385	...	2781.591	2943.453	3105.315	3267.177

After extraction combination harmonics we can calculate the mean function of raw signal.

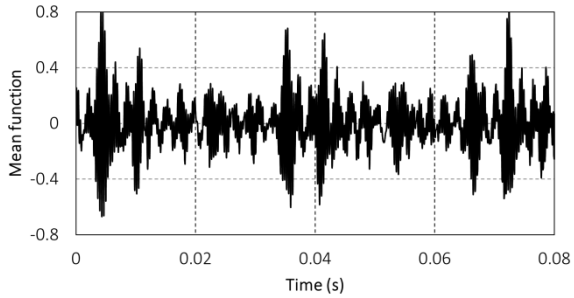


Fig. 4. Mean function of raw signal

The groups which follow one after other with intervals that are close to the shaft rotation period are mostly clearly observed in Fig. 4.

V. Conclusion

It is shown that the BPNRP is the adequate model for the vibrations of rolling bearing with inner race fault. Using quasi-LS techniques enables to estimate BPNRP basic frequencies (shaft rotation frequency and BPFI). Signal spectra consist of the periodical components with two basic frequencies and their multiples, and also the combination component. It is displayed the variance amplitude spectra of the signal and its Hilbert transform are identical, so the common used in literature definition of the squared envelope as the squared modulus of analysis signal is not correct in this case.

References

[1] Javorskyj I.M. Mathematical models and analysis of stochastic oscillations – Lviv, IPM NAS of Ukraine, 2013. – 802 P. (in Ukrainian)

[2] Napolitano A. Cyclostationary processes and time Series: Theory, applications, and generalizations Academic Press, Elsevier, London (2020).

[3] Javorskyj I., Yuzefovych R., Kravets I., Matsko I. Methods of periodically correlated random processes and their generalizations. In: Cyclostationarity: Theory and Methods. Lecture Notes in Mechanical Engineering. New York:Springer (2014), 73-93.

[4] Javorskyj I., Yuzefovych R., Kravets I., Matsko I. Periodically correlated processes: applications in early diagnostics of mechanical systems. Mechanical Systems and Signal Processing (2017), 83:406-438.

[5] Javorskyj I., Yuzefovych R., Lychak O., Semenov P., Shyepko R. Detection of distributed and localized faults in rotating machines using periodically non-stationary covariance analysis of vibrations. Measurement Science and Technology (2023), 34:065-102

[6] Javorskyj I., Yuzefovych R., Lychak O., Trokhym G., Varyvoda M. Methods of periodically non-stationary random processes for vibrations monitoring of rolling bearing with damaged outer race. Digital Signal Processing (2024), 145:104343.

MCIT Modeling, control & information technologies

On the Solution of the Linear Set-valued Homogeneous Cauchy Problem with the Hukuhara Derivative

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.077

Andrej Plotnikov
Department of Information Technology and Applied Mathematics
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
Odessa, Ukraine
a-plotnikov@ukr.net

Abstract—**The paper considers a linear set-valued homogeneous Cauchy problem with the Hukuhara derivative and provides its analytical solution.**

Keywords—linear; Cauchy problem; se-valued mapping; Hukuhara derivative

I. Introduction

As is well established, the theory of set-valued differential equations finds extensive application in control theory, the theory of differential inclusions, and fuzzy systems (see [1–6] and references therein). At first sight, such equations resemble their classical counterparts; however, their analysis and solution inevitably require explicit consideration of their set-valued character. Consequently, classical methods and approaches developed for single-valued systems cannot, in general, be applied directly to the set-valued case, thereby necessitating the development of new or adapted methodologies. Moreover, the inherent set-valued structure of these equations gives rise to distinctive properties that warrant systematic investigation.

The report presents an analytical form of the solution for a linear homogeneous differential equation with the Hukuhara derivative.

II. Preliminaries

Let R be the set of real numbers and R^n be the n-dimensional Euclidean space ($n \geq 2$). Denote by $conv(R^n)$ the set of nonempty compact and convex subsets of R^n.

For two given sets $X, Y \in conv(R^n)$ and $\lambda \in R$, the Minkowski sum and scalar multiple are defined by $X + Y = \{x + y \mid x \in X, y \in Y\}$ and $\lambda X = \{\lambda x \mid x \in X\}$.

The following properties hold:

1) $X + Y = Y + X \in conv\left(R^n\right)$, $\lambda X \in conv\left(R^n\right)$;
2) If $\alpha\beta \geq 0$, then $\alpha X + \beta X = (\alpha + \beta) X$;
3) $\lambda X + \lambda Y = \lambda\left(X + Y\right)$.

Also, let's add one more operation: the product of a matrix with a set $AX = \bigcup_{x \in X} Ax$, where $A \in R^{n \times n}$ is real matrix of size $n \times n$ and $X \in conv\left(R^n\right)$.

We will list some properties of this operation:

1) If $A \in R^{n \times n}$ and $X \in conv(R^n)$, then $AX \in conv\left(R^k\right)$, where $k = rank(A)$;
2) If $A \in R^{n \times n}$ and $X, Y \in conv(R^n)$, then $AX + AY = A\left(X + Y\right)$;
3) If $A, B \in R^{n \times n}$ and $X \in conv(R^n)$, then $\left(A + B\right)X \subseteq AX + BX$;
4) If $A \in R^{n \times n}$, $X, Y \in conv(R^n)$ and $X \subseteq Y$, then $AX \subseteq AY$.

Consider the Pompeiu-Hausdorff distance $h(\cdot,\cdot)$ given by

$$h(X,Y) = \min\left\{r \geq 0 \mid X \subset Y + B_r(0),\ Y \subset X + B_r(0)\right\},$$

where $B_r(0) = \left\{x \in R^n \mid \mathsf{P}x\mathsf{P} \leq r\right\}$ is the closed ball with radius r centered at the origin ($\mathsf{P}x\mathsf{P}$ denotes the Euclidean norm).

It is known that $(conv(R^n), h)$ is a complete metric space. However, $conv(R^n)$ is not a linear space since it does not contain inverse elements for the addition, and therefore difference is not well defined, i.e. if $A \in conv(R^n)$ and $A \neq \{a\}$, then $A + (-1)A \neq \{0\}$. As a consequence, alternative formulations for difference have been suggested. One of these alternatives is the Hukuhara difference [7].

Let $X, Y \in conv(R^n)$. A set $Z \in conv(R^n)$ such that $X = Y + Z$ is called a Hukuhara difference (H-

difference) of the sets X and Y and is denoted by $X \overset{H}{-} Y$.

In this case $X \overset{H}{-} X = \{0\}$ and also $(A+B) \overset{H}{-} B = A$ for any $A, B \in conv(R^n)$.

Simultaneously, M. Hukuhara introduced the concept of H-differentiability [7] for set-valued mappings by using the H-difference.

Definition 1 [7]. Let $X:[0,T] \to conv(R^n)$ and $t \in [0,T]$. We say that $X(\cdot)$ has a H-derivative $D_H X(t) \in conv(R^n)$ at $t \in (0,T)$, if for all $\Delta > 0$ that are sufficiently close to 0, the H-differences and the limits exist

$$\lim_{\Delta \to 0} \Delta^{-1} (X(t+\Delta) \overset{H}{-} X(t)) =$$

$$\lim_{\Delta \to 0} \Delta^{-1} (X(t) \overset{H}{-} X(t-\Delta)) = D_H X(t).$$

Theorem 1 [7]. If the mapping $X:[0,T] \to conv(R^n)$ is H-differentiable on $[0,T]$, then $X(t) = X(0) + \int_0^t D_H X(s) ds$, where the integral is understood in the sense of [7].

Corollary 1. If the set-valued mapping $X(\cdot)$ is H-differentiable on $[0,T]$, then $diam(X(\cdot))$ is a non-decreasing function on $[0,T]$.

Corollary 2. If the function $diam(X(\cdot))$ is a decreasing function on $[0,T]$, then the set-valued mapping $X(\cdot)$ is not H-differentiable on $[0,T]$.

III. Linear Cauchy Problem

Now, consider the Cauchy problem

$$D_H X(t) = A(t) X(t), \quad X(0) = X_0, \qquad (1)$$

where $X:[0,T] \to conv(R^n)$ is the unknown set-valued mapping, $A:[0,T] \to R^{n \times n}$ is a continuous matrix function and $\det(A(t)) \neq 0$ for all $t \in [0,T]$.

The set-valued mapping $X(\cdot)$ will be called the solution of the system (1) on the interval $[0,T]$ if it is continuously and satisfies system (1) on $[0,T]$.

Theorem 2. System (1) has a unique solution of the form

$$X(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\int_0^t A(\tau_k) \int_0^{\tau_k} A(\tau_{k-1}) \ldots \int_0^{\tau_2} A(\tau_1) X_0 d\tau_1 \ldots d\tau_k \right]$$

for all $t \in [0,T]$.

Remark. For all $k \geq 1$ and $t \in [0,T]$

$$\int_0^t A(\tau_k) \int_0^{\tau_k} A(\tau_{k-1}) \ldots \int_0^{\tau_2} A(\tau_1) d\tau_1 \ldots d\tau_k X_0 \subseteq$$

$$\int_0^t A(\tau_k) \int_0^{\tau_k} A(\tau_{k-1}) \ldots \int_0^{\tau_2} A(\tau_1) X_0 d\tau_1 \ldots d\tau_k.$$

Remark. If the matrices $A(t)$ and $A(s)$ are commutative matrices for all $t,s \in [0,T]$, i.e. the equality $A(t)A(s) = A(s)A(t)$ holds for all $t,s \in [0,T]$, then

$$X(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^t \frac{\left(\int_s^t A(\tau) d\tau \right)^{k-1}}{(k-1)!} A(s) X_0 ds$$

for all $t \in [0,T]$.

Remark. If the matrix $A(t) \equiv A$, then

$$X(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{A^k t^k}{k!} X_0 \right]$$

for all $t \in [0,T]$.

Remark. If the singular values of the matrix A are such that $\sigma_1 = \ldots = \sigma_n = \sigma$ and $AX_0 = \sigma X_0$, then

$$X(t) = e^{\sigma t} X_0$$

for all $t \in [0,T]$.

References

[1] V. Lakshmikantham, T. Granna Bhaskar, and J. Vasundhara Devi, "Theory of set differential equations in metric spaces," Cambridge Scientific Publishers, Cambridge, 2006.

[2] N.A. Perestyuk, V.A. Plotnikov, A.M. Samoilenko, and N.V. Skripnik, "Differential equations with impulse effects: multivalued right-hand sides with discontinuities," de Gruyter Stud. Math., vol. 40, Berlin/Boston, Walter De Gruyter GmbH& Co, 2011.

[3] V.A. Plotnikov, A.V. Plotnikov, and A.N. Vityuk, "Differential equations with a multivalued right-hand side. Asymptotic methods," AstroPrint, Odessa, 1999.

[4] A.V. Plotnikov and N.V. Skripnik, "Differential equations with "clear" and fuzzy multivalued right-hand side. Asymptotics methods," AstroPrint, Odessa, 2009.

[5] A.A. Martynyuk, "Qualitative analysis of set-valued differential equations." Springer Nature, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-07644-3

[6] A. Tolslonogov, "Differential inclusions in a Banach space," Kluwer Publishers, Dordrecht, 2000.

[7] M. Hukuhara, "Integration des applications mesurables dont la valeur est un compact convexe, " Funkc. Ekvacioj, Ser. Int., no. 10, 1967, pp. 205–223

MCIT Modeling, control & information technologies

Control Strategies for Retrial Queues with a Single Retrial Attempt

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.078

Oksana Pryshchepa
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
o.v.pryshchepa@nuwm.edu.ua

Paweł Komada
Lublin University of Technology
Lublin, Poland
p.komada@pollub.pl

Abstract—**In this paper, we consider retrial queueing systems with an input flow rate that depends on the number of calls in an orbit and with a limited number of retrials. According to threshold and hysteresis strategies, optimization problems for the effective operation of the system are formulated and solved. The quality functionals are built in terms of the stationary probabilities of the underlying Markov process describing the system. By solving the optimization problems, we obtain optimal policies that ensure effective and stable system operation under varying load conditions and retrial limitations.**

Keywords—***retrial queueing system; stationary probability; threshold strategy; hysteresis strategy***

I. Introduction

Retrial queues are a class of stochastic models that are applied for the modelling of computer and telecommunication systems, call centres and control systems in airports. These models consider the features of the service process that are not used in the classical queueing systems. If the input call finds all servers busy, it becomes a source of repeated calls. The calls can try to get service an infinite number of times [1], [2]. However, from a practical point of view, the number of repeated attempts is limited, particularly when security considerations are critical [6].

In this paper, we consider a multi-channel retrial queue with a controlled input flow rate and with a single retrial attempt to initiate service, where the input flow rate depends on the number of repeated attempt sources at a current moment (see [3]). This allows to control of the input flow to enhance service quality and achieve higher system revenue according to threshold and hysteresis strategies. The following parameters characterize the system: c is the number of channels, λ_j is the input flow rate, μ is the service rate and ν is the rate of repeated attempts.

II. Threshold Strategy

According to the threshold strategy, if at some moment the total number of customers in the system's orbit does not exceed the value H, the system operates in the first mode with the input flow rate h_1. If the number of customers exceeds H, the system switches to a second mode with an input flow rate h_2. Formally, setting a threshold strategy implies the following dependence on the number of repeated calls:

$$\lambda_j = \begin{cases} h_1, & j <= H, \\ h_2, & j > H. \end{cases}$$

Let us define this system as a two-dimensional continuous-time Markov process

$$Q(t,H) = (Q_0(t,H), Q_1(t,H)),\ t \geq 0$$

in the phase space $S(H) = \{0,1,...,c\} \times Z_+$, where $Q_0(t,H)$ is the number of busy channels at time t, $Q_1(t,H)$ is the number of repeated attempt sources (customers in orbit) at time t.

The optimal control problem for the retrial queues with a single retrial attempt consists in searching for such thresholds H that are a solution of the optimization problem:

$$L(H) = C_1 L_1(H) + C_2 L_2(H) - C_3 L_3(H) - C_4 L_4(H) - \\ -C_5 L_5(H) \to \max,\ H \in \{0,1,...\}, \quad (1)$$

where the cost coefficients are: C_i is the income relating to the service of a call in the i-th mode, $i = 1,2$; C_3 is the penalty for refusing to provide a service; C_4 is the penalty relating to switching of the input flow rate; C_5 is the penalty relating to lost call after failed repeated attempt; $L_i(H) = \lim_{t\to\infty} t^{-1} L_i(t,H)$, $i = \overline{1,5}$: $L_i(t,H)$ is the number of calls served in the i-th mode, $i = 1,2$; $L_3(t,H)$ is the number of calls which become repeated calls; $L_4(t,H)$ is the number of switchings of the input flow; $L_5(t,H)$ is the number of calls that leave the system without service after repeated attempt. The quality functional $L(H)$ is built in terms of the system's stationary probabilities (see [3], [5]) via $L_i(t,H)$, $i = \overline{1,5}$:

$$L_1(H) = \mu \sum_{j=0}^{H} \sum_{n=1}^{c} n \pi_{nj}(H),$$

$$L_2(H) = \mu \sum_{j=H+1}^{\infty} \sum_{n=1}^{c} n \pi_{nj}(H),$$

$$L_3(H) = h_1 \sum_{j=0}^{H} \pi_{cj}(H) + h_2 \sum_{j=H+1}^{\infty} \pi_{cj}(H),$$

$$L_4(H) = h_1 \pi_{cH}(H) + (H+1)\nu \sum_{n=0}^{c} \pi_{nH+1}(H),$$

$$L_5(H) = \nu \sum_{j=1}^{\infty} j \pi_{cj}(H).$$

The solution to problem (1) is such threshold H that maximizes the average profit from the operation of the system.

III. Hysteresis strategy

Alternatively, a hysteresis strategy is built using two thresholds H_1 and H_2, $H_1 \le H_2$. If the number of customers in the orbit does not exceed H_1, the system operates in the first mode with the input flow rate h_1. If it exceeds H_2, the system operates in the second mode with the input flow rate h_2. When the number of customers is between H_1 and H_2, the system remains in the mode it occupied in the previous moment.

The service process of the system with a hysteresis strategy can be described by a three-dimensional process

$$Q(t, H_1, H_2) =$$

$$= \left(Q_0(t, H_1, H_2), Q_1(t, H_1, H_2), R(t, H_1, H_2)\right),\ t \ge 0,$$

where $Q_0(t, H_1, H_2)$ is the number of busy channels at time t, $Q_1(t, H_1, H_2)$ is the number of repeated attempt sources at time t, $R(t, H_1, H_2)$ is the system operating mode at time t. If $R(t, H_1, H_2) = 1$, then the system operates in the first mode with the input flow rate h_1. If $R(t, H_1, H_2) = 2$, then the system operates in the second mode with input flow rate h_2. The process $Q(t, H_1, H_2) \in S(Q, H_1, H_2)$ Markov chain with continuous time and the phase space

$$S(Q, H_1, H_2) = S^1(Q, H_1, H_2) \cup S^2(Q, H_1, H_2),$$

$$S^1(Q, H_1, H_2) \cap S^2(Q, H_1, H_2) = \varnothing,$$

$$S^1(Q, H_1, H_2) = \{(i, j, 1): i = 0, 1, ..., c;\ j = 0, ..., H_2\},$$

$$S^2(Q, H_1, H_2) = \{(i, j, 2): i = 0, 1, ..., c;\ j = H_1 + 1, ...\}.$$

The optimal control problem for the retrial queues with a single retrial attempt consists in searching for such thresholds H_1 and H_2, that are solutions of the optimization problem:

$$L(H_1, H_2) = C_1 L_1(H_1, H_2) + C_2 L_2(H_1, H_2) - C_3 L_3(H_1, H_2) - C_4 L_4(H_1, H_2) - C_5 L_5(H_1, H_2) \to \max, \quad (2)$$

$$H_1, H_2 \in \{0, 1, ...\},\ H_1 \le H_2,$$

where the cost coefficients are: C_i is the income relating to the service of a call in the *i*-th mode, $i = 1,2$; C_3 is the penalty for refusing to provide a service; C_4 is the penalty relating to switching of the input flow rate, C_5 is the penalty relating to lost call after failed repeated attempt; $L_i(H_1, H_2) = \lim_{t \to \infty} t^{-1} L_i(t, H_1, H_2)$, $i = \overline{1,5}$: $L_i(t, H_1, H_2)$ is the number of calls served in the *i*-th mode, $i = 1,2$; $L_3(t, H_1, H_2)$ is the number of calls which become repeated calls; $L_4(t, H_1, H_2)$ is the number of switchings of the input flow; $L_5(t, H_1, H_2)$ is the number of calls that leave the system without service after repeated attempt.

For the hysteresis strategy, the quality functional $L(H_1, H_2)$ is built in terms of the system's stationary probabilities (see [4]) according to functionals $L_i(H_1, H_2)$, $i = \overline{1,5}$:

$$L_1(H_1, H_2) = \mu \sum_{j=0}^{H_2} \sum_{i=1}^{c} i \pi_{ij}(1),$$

$$L_2(H_1, H_2) = \mu \sum_{j=H_1+1}^{\infty} \sum_{i=1}^{c} i \pi_{ij}(2),$$

$$L_3(H_1, H_2) = \sum_{j=0}^{H_2} h_1 \pi_{cj}(1) + \sum_{j=H_1+1}^{\infty} h_2 \pi_{cj}(2),$$

$$L_4(H_1, H_2) = h_1 \pi_{cH_2}(1) + (H_1 + 1)\nu \sum_{i=0}^{c} \pi_{iH_1+1}(2),$$

$$L_5(H_1, H_2) = \nu \left(\sum_{j=1}^{H_2} j \pi_{cj}(1) + \sum_{j=H_1+1}^{\infty} j \pi_{cj}(2) \right).$$

The solution to problem (2) is such thresholds H_1 and H_2 that maximize the average profit from the operation of the system.

Conclusion

According to threshold and hysteresis strategies, optimization problems for the effective operation of the system are formulated and solved, while the quality functionals are built in terms of the system's stationary probabilities.

References

[1] J. R. Artalejo, A. Gomez-Corral, "Retrial Queueing Systems: A Computational Approach,". Springer, Berlin, 2008.

[2] G.I. Falin, J.G.C. Templeton, "Retrial Queues," Chapman and Hall, London, 1997.

[3] O.V. Pryshchepa, E.O. Lebedev, "On a Multi-Channel Retrial Queueing System," Cybernetics and Systems Analysis, vol. 53 (3), 2017, pp. 441-449.

[4] O.V. Pryshchepa, "*M/M/c/N*-type system with single retrial attempt, controlled by a hysteresis strategy," Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series: Physical and Mathematical Sciences, No. 4, 2011, pp. 193–198.

[5] O. Pryshchepa, O. Kardash, A. Yakymchuk, M. Shvec, K. Pavlov, O. Pavlova, I. Irtyshcheva, N. Popadynets, Ye. Boiko and I. Kramarenko, "Optimization of multi-channel queuing systems with a single retrail attempt: Economic approach," Decision Science Letters, vol. 9(4), 2020, pp. 559–564.

[6] Y.W. Shin and D.H. Moon, "Approximations of retrial queue with limited number of retrials," Computers and Operations Research, vol. 37, №7, 2010, pp. 1262-1270.

MCIT Modeling, control & information technologies

Modeling of Two-phase Filtration Processes and Homogenization

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.078

Gennadiy Sandrakov
Faculty of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
GSandrako@gmail.com

Abstract—**Unsteady processes of two-phase flow filtrations for immiscible liquids in porous media with a periodic structure are considered. The Masket-Leveret model is adopted as a mathematical model for describing such processes for media formed by a large number of blocks with low permeability and separated by a connected system of faults with high permeability. This model is typical for modeling the processes of gas production, oil production and diffusion of pollutants (for example, oil products) in groundwater. The assumption of medium periodicity is a model as simply described, since it is not known how to describe real porous media. However, sometimes the results for periodic media can be generalized to stochastic media. In addition, complex media can sometimes be approximated by periodic or quasi-periodic, which are also reduced to periodic.**

Keywords— homogenized problems; porous media; approximating solutions; initial boundary value problems.

I. Introduction

The problem of modeling nonstationary processes of mutual filtration of multiphase flows of immiscible fluids in porous media arises in the development of oil and gas fields, the search for methods to prevent man-made pollution (e.g., petroleum products) in groundwater, and the search for ways to purify such waters. Direct practical study of such processes using technical observation methods is practically impossible, as it is necessary to install a large number of sensors over large areas and at various depths to understand the dynamics of the combined movement of various fluids in a porous medium. Thus, mathematical modeling offers a real opportunity to predict and potentially optimize methods of oil and gas production, as well as treatment and prevention of groundwater pollution.

To model such filtration processes, it is necessary to select a heterogeneous porous medium. One approach here is to use continuous media with a periodic structure. The assumption of medium periodicity is a model as simply described, since it is not known how to describe real porous media. However, sometimes the results for periodic media can be generalized to more complex and stochastic continuous media. Thus, periodic media formed by a large number of cells, which can be inhomogeneous and defines a multiscale inhomogeneous porous media, will be discussed. Accordingly, the parameter characterizing the number of cells determines the small size of this cell.

Thus, it is assumed that the coefficients of the equations characterizing this model of two-phase filtration depend on two small positive parameters ε and σ. The small-scale parameter ε defines the coefficient period, which corresponds to the assumption of the periodic structure of the porous media formed by blocks and separated by high permeable faults. The value inverse to the parameter σ characterizes the relative ratio of the permeability coefficients included in the equations and corresponds to the assumption of low and high permeability of blocks and faults forming porous media. Here we will consider the case $\sigma = \varepsilon^2$. This choice is usually called the dual porosity model.

II. Homogenization for Approximation

The functions, defining the solution of this problem under consideration, model the dynamic representation of two-phase filtration (or diffusion) in porous media. But, the direct finding of these functions by computational methods is practically impossible, since for the periodic media it is necessary to choose a very fine grid, depending on ε, in order to accurately take into account the geometry of blocks and faults. In addition, the spread of the ellipticity constants of this problem will depend on σ, which will also lead to a refinement of the computational grid in order to guarantee sufficient accuracy, which requires significant resources to calculate such functions.

In such a situation, for simpler problems, the following approach was first proposed in [1, 2]. To begin with, approximate solutions to the initial problem for small ε are found. The approximate solutions usually satisfy the initial boundary value problem with constant coefficients in the domain that do not depend on ε. This initial boundary value problem with constant coefficients is usually called a homogenized or homogenized approximation to the original initial boundary value problem. Then, the homogenized problem is solved by standard computational methods. Of course, it would be desirable to have an estimate of the accuracy of this approximation. For nonlinear problems, such estimates are not always provable and

one has to limit oneself to proving the appropriate convergence of these approximations. This approach has significant advantages, since solving the problem with constant coefficients is simpler and simultaneously approximates the solution to the original problem.

A detailed bibliography on the study of various aspects and homogenization methods for applying mathematical modeling to such problems in practice is given in [3, 4]. But, it is usually not taken into account that many real cellular media are formed by a large number of blocks with low permeability and separated by a connected system of faults with high permeability. Therefore, dependence on additional parameters arises when taking into account the structure of the porous medium under consideration. Here we will use the methods presented in [5, 6] for linear problems with dependence on such parameters. Following [7], we also note that filtration models typically consider homogeneous media, whose filtration coefficients and characteristics are obtained by averaging over volume without justifying this transition. However, this approach makes it unclear how to distinguish between possible filtration regimes, separating scales that are, in a sense, erased by averaging over volume.

III. Initial Boundary Value Problems

Thus, we consider nonstationary filtration processes of two-phase flows for immiscible separated liquids in porous media with a periodic structure. The Musket-Leveret model for such media is adopted as a mathematical model for describing such processes. Details on this and more general models of two-phase filtration in porous media can be found in [7, 8, 9].

This model is defined by the functions $S_w^\varepsilon, S_o^\varepsilon$, $P_w^\varepsilon, P_o^\varepsilon$, which correspond to the volume parts of the phases and the partial pressures in these phases, as a solution to the following initial boundary value problem

$$m_\varepsilon (S_o^\varepsilon)'_t - \operatorname{div}(K_\varepsilon^\sigma \Lambda_\varepsilon^o (S_o^\varepsilon)[\nabla P_o^\varepsilon - \rho_o G]) = r_\varepsilon^o G_o,$$

$$m_\varepsilon (S_w^\varepsilon)'_t - \operatorname{div}(K_\varepsilon^\sigma \Lambda_\varepsilon^w (S_w^\varepsilon)[\nabla P_w^\varepsilon - \rho_w G]) = r_\varepsilon^w G_w,$$

$$S_w^\varepsilon + S_o^\varepsilon = 1, \quad P_w^\varepsilon - P_o^\varepsilon = P_\varepsilon^c (S_w^\varepsilon).$$

This system of equations, supplemented by suitable boundary and initial conditions, is considered in the domain Ω on the time interval $(0,T)$. The indices o and w in the notations of the functions under consideration mean that these functions relate to one of the phases of liquids, for example, oil products and water. In addition, the index ε below usually means periodicity, while ε above emphasizes the dependence of the solution on this small parameter and $\sigma = \varepsilon^2$ characterizes the relative ratio of the permeability coefficients included in the equations and corresponds to the assumption of low and high permeability of blocks and faults forming porous media. In turn, the domain $\Omega = \Omega_\varepsilon^b \cup \Omega_\varepsilon^f$ is divided into two domains, which correspond to blocks and faults. It is assumed that the coefficients of the elliptic part of these equations are separated from zero, which corresponds to the absence of stagnation zones in the filtration process. By adding standard assumptions one can prove that a solution to such a problem exists, following [10], for example.

Thus, using asymptotic methods, we can pass to the limit in the problem and establish a limit homogenized problem, the solution of which is the limit functions that describe, in a certain sense, the filtration process globally. To briefly describe the homogenized problem, we note that the first terms in the equation are replaced by $m_b (S_o^b)'_t + m_f (S_o^f)'_t$ and $m_b (S_w^b)'_t + m_f (S_w^f)'_t$ with constant coefficients defined by the characteristics of the blocks and faults in natural notations. The remaining coefficients dependent on ε are also replaced by constants. The last two equations will be split into two parts for blocks and faults. But, the last equation will be determined by solving the problem on a cell for a single block. So, these will be six homogenized equations with respect to six unknowns, which are approximate solutions to the solutions of the initial problem.

Acknowledgment

This work has been supported by Grant of the Ministry of Education and Science of Ukraine for perspective development of a scientific direction ”Mathematical sciences and natural sciences” at Taras Shevchenko National University of Kyiv.

References

[1] A. Bensoussan, J. L. Lions, G. Papanicolaou, "Asymptotic analysis for periodic structures", Amsterdam, North-Holland, 1978.

[2] N. S. Bakhvalov, G. P. Panasenko, "Homogenization: averaging processes in periodic media", Kluwer, Dordrecht, 1989. doi: 10.1007/978-94-009-2247-1

[3] A. Mielke, S. Reichelt, M. Thomas, "Two-scale homogenization of nonlinear reaction-diffusion systems with slow diffusion", Netw. Heterog. Media, vol. 9:2, pp. 353-382, 2014. doi: 10.3934/nhm.2014.9.353

[4] S. Garttner, P. Knabner, N. Ray, "Local existence of strong solutions to micro-macro models for reactive transport in evolving porous media", European J. Applied Mathematics, vol. 35:1, pp. 127-154, 2024. doi: 10.1017/S095679252300013X

[5] G.V. Sandrakov, "Modeling and homogenization of filtration processes in periodic media with sources", Mathematical Modeling and Simulation of Systems. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1091, pp 19-32, Springer, Cham, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-67348-1_2

[6] G.V. Sandrakov, "Asymptotic expansion methods in homogenization and some applications", A Closer Look at Homogenization. Gulcin Yildiz (ed.). Nova Science Publishers, pp. 25-130, 2024. doi: 10.52305/CIBQ6632

[7] P. Dietrich, R. Helmig, M. Sauter, H. Hotzl, J. Kongeter, G. Teutsch (eds.), "Flow and transport in fractured porous media", Springer-Verlag, Berlin, 2005. doi: 10.1007/b138453

[8] A. Ya. Bomba, V. I. Boitsov, S. V. Yaroschak, "Mathematical modeling of the process of two-phase non-isothermal filtration based on thermo-gravitational drainage technology", J. Numerical and Applied Mathematics, vol. 1 (127), pp. 5-14, 2018. (in Ukrainian).

[9] Shib Sankar Ganguli, Vijay Prasad Dimri (eds.), "Reservoir characterization, modeling, and quantitative interpretation", Elsevier, Amsterdam, 2023. isbn: 978-0-323-99593-1

[10] D. Kroener, S. J. Luckhaus, "Flow of oil and water in a porous medium", J. Differential Equations, 55:2, 276–288, 1984. doi: 10.1016/0022-0396(84)90084-6

MCIT Modeling, control & information technologies

Application of Machine Learning for Ethical Decision-Making

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.080

Savych Dmytro
National University of
Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
d.v.savych@nuwm.edu.ua

Pryshchepa Oksana
National University of
Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
o.v.pryshchepa@nuwm.edu.ua

Naumchuk Oleksandr
National University of
Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
o.m.naumchuk@nuwm.edu.ua

Abstract—**This paper presents a conceptual and methodological framework for applying machine learning in managerial decision support systems to improve ethical outcomes. We review key fairness, explainability, privacy, and accountability methods, propose an integrated architecture that embeds ethical constraints within machine learning pipelines, and discuss governance frameworks for ensuring responsible deployment. The contribution is a roadmap for integrating ethical machine learning into organizational decision-making.**

Keywords—machine learning; managerial decision-making; fairness; explainability; governance

I. Introduction

Modern organizations increasingly rely on data-driven decision-making. Machine learning models can uncover patterns, forecast outcomes, and support managers in selecting optimal strategies. However, without appropriate safeguards, such systems may propagate biases, lack transparency, or violate privacy and fairness principles. The challenge is to embed ethical considerations within the machine learning lifecycle such that managerial decisions become both effective and socially responsible.

The aim of this paper is to outline methods and architectural approaches for ethical machine learning in decision support, along with governance and validation strategies to ensure accountability and trust.

II. Ethical Challenges in Decision-Support Machine Learning

Key risks associated with deploying machine learning in managerial contexts have been widely discussed in the literature. One major concern is algorithmic bias, which arises when skewed training data or model assumptions lead to unfair treatment of specific groups. Another is model opacity, where complex or "black box" algorithms make decision logic difficult to interpret for managers and stakeholders. Privacy risks also emerge when models inadvertently expose sensitive attributes or enable re-identification of individuals [2]. Furthermore, the lack of accountability in automated systems can obscure responsibility when incorrect or unethical decisions occur [4]. Finally, model drift and other unintended consequences may arise as data distributions change over time or models capture spurious correlations [6].

To mitigate these risks, researchers emphasize the need for embedding ethical constraints within the machine learning lifecycle, implementing continuous monitoring, and establishing governance frameworks that ensure transparency, fairness, and accountability [1], [3].

III. Methods for Ethical Machine Learning in Managerial Decision Systems

Ethical machine learning in managerial decision support requires approaches that ensure fairness, transparency, privacy, and accountability across the entire machine learning lifecycle. A variety of methodological solutions can be integrated into machine learning pipelines to achieve these objectives.

In the area of fairness and bias mitigation, methods such as reweighing, adversarial debiasing, and fairness through unawareness are used to reduce discrimination and ensure equitable model behaviour. Reweighing adjusts sample weights to balance distributions among protected groups, while adversarial debiasing trains a predictive model together with an adversary attempting to infer sensitive attributes, forcing the predictor to minimize bias. Fairness through unawareness removes sensitive variables such as gender or race from input features, though this method alone is often insufficient because proxy variables can still encode bias [1].

For explainability and interpretability, approaches such as LIME, SHAP, and counterfactual explanations make machine learning models more transparent and

understandable to decision-makers. LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations) generates local perturbation-based insights for individual predictions. SHAP (SHapley Additive exPlanations) quantifies feature importance using Shapley values, allowing both local and global interpretation. Counterfactual explanations illustrate minimal input changes that would lead to a different output, helping managers understand and justify automated decisions.

Ensuring privacy and confidentiality is another crucial dimension of ethical machine learning. Differential privacy introduces calibrated noise into data or outputs to protect individual identities. Federated learning allows distributed training without centralizing raw data, and homomorphic encryption enables computations on encrypted information, maintaining confidentiality throughout the process. Continuous validation and monitoring, including k-fold cross-validation, A/B testing, and model drift detection, ensure that model performance remains reliable and ethically compliant over time.

Finally, governance and auditing frameworks provide the structural foundation for accountability and trust. Ethics-based auditing (EBA) establishes systematic evaluations of system behavior against ethical norms, while the ECCOLA method offers a structured framework for governing ethical AI throughout its lifecycle [5].

IV. Ethical Machine Learning Architecture For Decision-Making Systems

A high-level architecture for embedding ethical machine learning into managerial decision support systems involves multiple integrated layers that ensure fairness, transparency, privacy, and accountability throughout the machine learning lifecycle.

The first layer focuses on data preparation, including data ingestion, quality checks, bias detection, and preprocessing techniques such as reweighing and anonymization. This stage ensures that the training data are reliable, ethically balanced, and privacy-preserving.

The second layer addresses model training under ethical constraints**.** Predictive models are trained with fairness-regularization or adversarial fair learning approaches to mitigate bias [2]. Privacy-preserving techniques, such as differential privacy and federated learning, are incorporated to maintain data confidentiality while enabling effective learning.

An interpretability and explanation module forms the third layer, generating outputs such as SHAP, LIME, or counterfactual explanations. These tools provide transparency into model decisions, allowing managers to understand the rationale behind predictions and supporting trust in automated recommendations.

The fourth layer integrates decision-making with human oversight**.** Model suggestions are presented to managers along with explanations, enabling human decision-makers to override, adjust, or validate automated recommendations. This human-in-the-loop approach ensures that final decisions consider both algorithmic insights and managerial judgment.

The fifth layer implements monitoring and feedback, tracking model performance, fairness metrics, and potential drift over time. Continuous monitoring supports revalidation, retraining, and corrective actions whenever the system's predictions deviate from expected ethical or operational standards.

Finally, the governance and audit layer ensures accountability and compliance. Ethical audits, logging of decisions, and accountability tracing are implemented to guarantee that machine learning-driven recommendations adhere to organizational and societal norms.

This architectural framework ensures that machine learning-generated suggestions are not blindly followed but are mediated by interpretability, human oversight, and governance mechanisms, promoting ethically responsible managerial decision-making.

Conclusion

Integrating machine learning into managerial decision-making systems offers significant potential, but ethical risks must be proactively managed. By applying fairness-enhancing methods, interpretability and explainability tools, privacy-preserving techniques, and governance frameworks such as ethics-based auditing, organizations can develop decision support systems that are both effective and ethically robust. Future research should focus on domain-specific case studies, empirical validation of ethical interventions, and longitudinal assessments of governance and audit outcomes.

References

[1] S. Barocas, M. Hardt, and A. Narayanan, Fairness and Machine Learning: Limitations and Opportunities. MIT Press, 2019.

[2] I.O. Gallegos, R.A. Rossi, J. Barrow, M.M. Tanjim, S. Kim, F. Dernoncourt, T.Yu, R. Zhang, & N. Ahmed, "Bias and Fairness in Large Language Models: A Survey," Computational Linguistics, vol. 50, pp. 1097-1179.

[3] A. Jobin, M. Ienca, and E. Vayena, "The global landscape of AI ethics guidelines," Nature Machine Intelligence, vol. 1, no. 9, pp. 389–399, 2019.

[4] J. Morley, L. Floridi, L. Kinsey, and A. Elhalal, "From what to how: An initial review of publicly available AI ethics tools, methods and research to translate principles into practices," Science and Engineering Ethics, vol. 27, no. 4, pp. 1–31, 2021.

[5] Mokander, J., Floridi, L., & Cave, S. Ethics-based auditing of automated decision-making systems: Nature, scope, and limitations. arXiv preprint arXiv:2108.11857, 2021.

[6] D. Sculley, G. Holt, D. Golovin, V. Davydov, T. Phillips, E. Ebner, et al., "Hidden technical debt in machine learning systems," in Proc. 28th Int. Conf. Neural Information Processing Systems (NIPS), 2015.

MCIT Modeling, control & information technologies

Self-adaptive proximal algorithms for equilibrium problems in Hadamard space

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.081

Vladimir Semenov
Faculty of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
semenov.volodya@gmail.com

Vladislava Chernorai
Faculty of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
vlada2002vlada2001@gmail.com

Serhii Denysov
Harbour.Space Institute of Technology
Barcelona, Spain
sireukr@gmail.com

Abstract—**We consider a new self-adaptive algorithms for equilibrium problem in Hadamard spaces. At each step of the algorithms, the sequential minimization of two special strongly convex functions is performed. Our self-adaptive algorithms do not calculate bifunction values at additional points and do not require knowledge of bifunctions' Lipschitz constants. For pseudomonotone bifunctions of Lipschitz-type, theorems on weak convergence of sequences generated by algorithms are proved.**

Keywords—Hadamard space, equilibrium problem, algorithms, convergence

I. Introduction

There are many problems arising from applied nonlinear analysis that can be modeled as an equilibrium problem. The equilibrium problem includes as particular cases, optimization problems, variational inequalities, Nash equilibrium problems, as well as some other problems of interest in many applications [1, 2]. The formulation of the equilibrium problem was first given in the works of H. Nikaido and K. Isoda in the 1950s [3]. These works are devoted to proving the existence of Nash equilibrium points in non-cooperative games. The current stage in the study and application of equilibrium problems began with the article [4]. The study of algorithms for solving equilibrium problems is actively continuing. Recently, motivated by problems of Machine Learning, there has been a need to develop theory and algorithms for solving mathematical programming problems in metric Hadamard spaces (also known as CAT(0) spaces) [5]. Another strong motivation for studying these problems is the possibility of writing certain nonconvex problems in geodesically convex form in a space with a specially chosen Riemannian metric [6]. A notable interest has arisen in equilibrium problems in Hadamard spaces [7, 8].

In this paper, we consider a new self-adaptive algorithms for equilibrium problem in Hadamard spaces. At each step of the algorithms, the sequential minimization of two special strongly convex functions is performed. Our self-adaptive algorithms do not calculate bifunction values at additional points and do not require knowledge of bifunctions' Lipschitz constants.

Details about Hadamard spaces can be found in [5].

II. Equilibrium problem in a Hadamard space

Let (X,d) be a Hadamard space. Consider the equilibrium problem for nonempty closed convex set $C \subseteq X$ and bifunction $F: C \times C \to R$:

$$\text{find } x \in C \text{ such that } F(x,y) \geq 0 \quad \forall y \in C. \quad (1)$$

Suppose that the following conditions hold:

(A1) $F(x,x) = 0$ for all $x \in C$;

(A2) functions $F(x,\cdot): C \to R$ are convex and lower semicontinuous for all $x \in C$;

(A3) functions $F(\cdot,y): C \to R$ are upper weakly semicontinuous for all $y \in C$;

(A4) bifunction $F: C \times C \to R$ is pseudomonotone, i.e. for all x, $y \in C$ from $F(x,y) \geq 0$ it follows that $F(y,x) \leq 0$.

(A5) bifunction $F: C \times C \to R$ is Lipschitz type, i.e. there exist $a > 0$, $b > 0$, such that $\forall x, y, z \in C$

$$F(x,y) \leq F(x,z) + F(z,y) + ad^2(x,z) + bd^2(z,y).$$

If $F(x,y) = (Ax, y-x)$, where $A: C \to H$, C is nonempty subset of Hilbert space H, then problem (1) takes form of variational inequality

$$\text{find } x \in C \text{ such that } (Ax, y-x) \geq 0 \quad \forall y \in C.$$

Henceforth, we assume that $S \neq \varnothing$.

III. Self-adaptive proximal algorithms

For approximate solution of (1) we consider extraproximal algorithm with adaptive choice of step size [9].

Algorithm 1. Choose element $x_1 \in C$, $\tau \in (0,1)$, $\lambda_1 \in (0,+\infty)$. Set $n=1$.

Step 1. Compute

$$y_n = \arg\min_{y\in C}\left(F(x_n,y)+\tfrac{1}{2\lambda_n}d^2(y,x_n)\right).$$

If $x_n = y_n$, then stop and $x_n \in S$. Otherwise, go to step 2.

Step 2. Compute

$$x_{n+1} = \arg\min_{y\in C}\left(F(y_n,y)+\tfrac{1}{2\lambda_n}d^2(y,x_n)\right).$$

Step 3. Compute

$$\lambda_{n+1} = \begin{cases} \lambda_n, \text{ if } \quad F(x_n,x_{n+1})-F(x_n,y_n)-F(y_n,x_{n+1}) \le 0, \\ \min\left\{\lambda_n, \dfrac{\tau}{2}\dfrac{d^2(x_n,y_n)+d^2(x_{n+1},y_n)}{\left(F(x_n,x_{n+1})-F(x_n,y_n)-F(y_n,x_{n+1})\right)}\right\}, \text{ otherwise.} \end{cases}$$

Set $n := n+1$ and go to step 1.

On each step of Algorithm 1 we need to solve two convex problems with strongly convex functions. No information about constants a and b is used.

Obviously the sequence (λ_n) is nonincreasing. Also it is lower bounded by $\min\{\lambda_1, \tau/2\max\{a,b\}\}$.

Let us prove an important estimate relating the distances between the points generated by Algorithm 1 to an arbitrary element of the set of solutions S.

Lemma 1. For the sequences (x_n) and (y_n), generated by Algorithm 1, the following inequality holds:

$$d^2(x_{n+1},z) \le d^2(x_n,z) - \left(1-\tau\frac{\lambda_n}{\lambda_{n+1}}\right)d^2(x_{n+1},y_n) - \left(1-\tau\frac{\lambda_n}{\lambda_{n+1}}\right)d^2(y_n,x_n),$$

where $z \in S$.

Let us formulate one of the main results.

Theorem 1 ([9]). Let (X,d) be an Hadamard space, $C \subseteq X$ be a nonempty convex closed set, for bifunction $F: C\times C \to R$ conditions A1–A5 are satisfied and $S \neq \varnothing$. Then sequences (x_n), (y_n) generated by Algorithm 1 converge weakly to the solution $z \in S$ of equilibrium problem (1), moreover, $\lim\limits_{n\to\infty} d(y_n,x_n) = \lim\limits_{n\to\infty} d(y_n,x_{n+1}) = 0$.

In paper [10] for solution of problem (1) the following algorithm was proposed

$$\begin{cases} y_n = \arg\min_{y\in C}\left(F(y_{n-1},y)+\tfrac{1}{2\lambda_n}d^2(y,x_n)\right), \\ x_{n+1} = \arg\min_{y\in C}\left(F(y_n,y)+\tfrac{1}{2\lambda_n}d^2(y,x_n)\right), \end{cases} \quad (2)$$

where values $\lambda_n > 0$ were set according to the requirement

$$\{\inf_n \lambda_n, \sup_n \lambda_n\} \subseteq \left(0, \frac{1}{2(2a+b)}\right),$$

i.e. the information about constants from condition (A5) was used. Based on the scheme (2) and paper [11], we construct a two-stage proximal algorithm with adaptive choice of the value λ_n.

Algorithm 2. Choose elements x_1, $y_0 \in C$, $\tau \in (0,\tfrac{1}{3})$, $\lambda_1 \in (0,+\infty)$. Set $n=1$.

Step 1. Compute

$$y_n = \arg\min_{y\in C}\left(F(y_{n-1},y)+\tfrac{1}{2\lambda_n}d^2(y,x_n)\right).$$

Step 2. Compute

$$x_{n+1} = \arg\min_{y\in C}\left(F(y_n,y)+\tfrac{1}{2\lambda_n}d^2(y,x_n)\right).$$

If $x_{n+1} = x_n = y_n$, then stop and $x_n \in S$. Otherwise, go to step 3.

Step 3. Compute

$$\lambda_{n+1} = \begin{cases} \lambda_n, & \text{if} \quad F(y_{n-1},x_{n+1})-F(y_{n-1},y_n)-F(y_n,x_{n+1}) \le 0, \\ \min\left\{\lambda_n, \dfrac{\tau}{2}\dfrac{d^2(y_{n-1},y_n)+d^2(x_{n+1},y_n)}{\left(F(y_{n-1},x_{n+1})-F(y_{n-1},y_n)-F(y_n,x_{n+1})\right)}\right\}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Set $n := n+1$ and go to the step 1.

Let us present the main results on the convergence of the Algorithm 2.

Lemma 2 ([12]). For the sequences (x_n) and (y_n), generated by Algorithm 2, the following inequality holds:

$$d^2(x_{n+1},z) \le d^2(x_n,z) - \left(1-\tau\frac{\lambda_n}{\lambda_{n+1}}\right)d^2(x_{n+1},y_n) - \left(1-2\tau\frac{\lambda_n}{\lambda_{n+1}}\right)d^2(y_n,x_n) + 2\tau\frac{\lambda_n}{\lambda_{n+1}}d^2(x_n,y_{n-1}),$$

where $z \in S$.

Theorem 2 ([12]). Let (X,d) be a Hadamard space, $C \subseteq X$ be a nonempty convex closed set, for bifunction $F: C\times C \to R$ conditions A1–A5 are satisfied and $S \neq \varnothing$. Then sequences (x_n), (y_n), generated by Algorithm 2, converge weakly to the solution $z \in S$ of problem (1).

In the future, we plan to consider more specialized versions of the Algorithm 2 for variational inequalities and min-max problems on Hadamard manifolds (for

example, on the manifold of symmetric positive definite matrices). Constructing randomized adaptive versions of algorithms is also an interesting research direction.

IV. Conclusions

We considered equilibrium problems in metric Hadamard spaces. For an approximate solution of equilibrium problems, iterative two-stage proximal algorithms have been proposed and studied. At each step of the algorithms, the sequential minimization of two special strongly convex functions should be done. Our self-adaptive algorithms do not calculate bifunction values at additional points and do not require knowledge of bifunction's Lipschitz constants. For pseudo-monotone bifunctions of the Lipschitz type, weakly upper semicontinuous in the first variable, convex and lower semicontinuous in the second variable, theorems establishing the convergence of sequences generated by the algorithms are proved.

A direction for future research could be the exploration of possible extensions of our results to Banach spaces [13] and stochastic setup [14]. And of course the question of the rate of convergence under stronger assumptions is very important.

Acknowledgment

This work was supported by the NAS of Ukraine (project “New subgradient and extragradient methods for non-smooth regression problems”, 0124U002162).

References

[1] G. Kassay, V.D. Radulescu, Equilibrium Problems and Applications, Academic Press, London, 2019.

[2] F. Giannessi, A. Maugeri, P.M. Pardalos, Equilibrium Problems: Nonsmooth Optimization and Variational Inequality Models, Kluwer Academic Publishers, New York–Boston–Dordrecht–London–Moscow, 2004.

[3] H. Nikaido, K. Isoda, “Note on noncooperative convex games,” Pacific Journal of Mathematics, vol. 5, pp. 807–815, 1955.

[4] E. Blum, W. Oettli, “From optimization and variational inequalities to equilibrium problems,” Math. Stud., vol. 63, pp. 123–145, 1994.

[5] M. Bacak, Convex Analysis and Optimization in Hadamard Spaces, De Gruyter, Berlin, 2014.

[6] V. Colao, G. Lopez, G. Marino, V. Martin-Marquez, “Equilibrium problems in Hadamard manifolds,” Journal of Mathematical Analysis and Applications, vol. 388, pp. 61–77, 2012.

[7] H. Khatibzadeh, V. Mohebbi, “Monotone and pseudo-monotone equilibrium problems in Hadamard spaces,” J. of the Australian Math. Soc., vol. 110, pp. pp. 220–242, 2019.

[8] H. Khatibzadeh, V. Mohebbi, “Approximating solutions of equilibrium problems in Hadamard spaces,” Miskolc Mathematical Notes, vol. 20, pp. 281–297, 2019.

[9] S.V. Denysov, O.Yu. Kovalenko, V.V. Semenov, “Convergence of Adaptive Algorithms for Equilibrium Problems in Hadamard Spaces,” Journal of Optimization, Differential Equations, and Their Applications, vol. 33, no. 1, pp. 42–67, 2025.

[10] Y.I. Vedel, G.V. Sandrakov, V.V. Semenov, L.M. Chabak, “Convergence of a Two-Stage Proximal Algorithm for the Equilibrium Problem in Hadamard Spaces,” Cybernetics and Systems Analysis, vol. 56, issue 5, pp. 784–792, 2020.

[11] S.V. Denisov, D.A. Nomirovskii, B.V. Rublyov, V.V. Semenov, “Convergence of Extragradient Algorithm with Monotone Step Size Strategy for Variational Inequalities and Operator Equations,” Journal of Automation and Information Sciences, vol. 51, issue 6, pp. 12–24, 2019.

[12] Y.I. Vedel, G.V. Sandrakov, V.V. Semenov, “An Adaptive Two-Stage Proximal Algorithm for Equilibrium Problems in Hadamard Spaces,” Cybernetics and Systems Analysis, vol. 56, issue 6, pp. 978–989, 2020.

[13] Y. Alber, I. Ryazantseva, Nonlinear Ill Posed Problems of Monotone Type, Springer, Dordrecht, 2006.

[14] A. Chakraborty, A. Nedic, “Random Methods for Variational Inequalities,” arXiv preprint arXiv:2402.05462. 2024.

MCIT Modeling, control & information technologies

Analysis of vibrations of the working body of the vibrating separator in the resonant mode

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.082

Natalia Smetankina
Doctor of Technical Sciences, Head: Dept. of Vibration and Thermostability Studies
Anatolii Pidgornyi Institute of Power Machines and Systems of NAS of Ukraine
Kharkiv, Ukraine
nsmetankina@ukr.net

Ievgeniia Misiura
Associate Professor: Dept. of Economic and Mathematical Modeling
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
Kharkiv, Ukraine
ievgeniia.misiura@hneu.net

Serhii Misiura
National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute" Kharkiv, Ukraine
Senior Researcher: Dept. of Vibration and Thermostability Studies
Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems of NAS of Ukraine
Kharkiv, Ukraine
serhii.misiura@khpi.edu.ua

Abstract — **This paper analyzes the nonlinear vibrations of the working body of a vibrating separator in resonant modes, focusing on the redistribution of energy between oscillation coordinates. Using the asymptotic averaging method, approximate solutions and auxiliary equations are derived to study the spatial stability of oscillations under combination resonances. It is shown that resonance relations involving the sum of natural frequencies and the excitation frequency do not disturb the planned technological process, ensuring stable operation of vibratory grain cleaning machines. The obtained results define parameter conditions that ensure stable operation of vibratory grain cleaning machines with helical oscillations of the working body.**

Keywords — vibration separators; nonlinear oscillations; natural frequencies; working body; resonant mode; external force; spatial stability (key words)

I. Introduction

The working body of the vibrating separator must perform oscillations that are provided for by the technological process. Therefore, external disturbing forces act in the direction of not all, but only some coordinates. In nonlinear systems, which also include vibration separators, it is possible to redistribute the energy supplied from the outside in such a way that intense vibrations occur in the direction of the undisturbed coordinates [1].

In this paper, we consider the redistribution of energy between coordinates if resonant ratios arise between the natural frequencies of the oscillating system and the frequencies of external action on the oscillating system. Resonant modes associated with coordinates in the direction of which external disturbing forces do not act can change the law of motion of the working body of a vibrating separator.

In this regard, it is necessary to know the set of parameters of the oscillatory system under which unfavorable conditions of energy distribution between the coordinates arise.

II. Problem Formulation

We study the nonlinear oscillations of a vibratory grain cleaning machine with helical oscillations of the working body in the resonant case.

A. Mathematical model

The differential equations of motion of the oscillating system can be written in the following form:

$$\begin{aligned}
&\ddot{\xi}+P_{\xi}{}^{2}\xi=\mu\Phi_{\xi}\left(\dot{\xi},\phi,\dot{\phi},\ddot{\phi},t\right);\\
&\ddot{\eta}+P_{\eta}{}^{2}\eta=\mu\Phi_{\eta}\left(\dot{\eta},\theta,\dot{\theta},\ddot{\theta},t\right);\\
&\ddot{\zeta}+P_{\zeta}^{2}\zeta=\mu\Phi_{\zeta}\left(\zeta,\theta,\phi,\dot{\theta},\dot{\phi},\ddot{\theta},\ddot{\phi},t\right)+F_{\zeta}\cos\omega t;\\
&\ddot{\theta}+P_{\theta}^{2}\theta=\mu\Phi_{\theta}\left(\eta,\zeta,\theta,\phi,\varphi,\dot{\theta},\dot{\phi},\dot{\varphi},\ddot{\eta},\ddot{\zeta},\ddot{\theta},\ddot{\phi},t\right);\\
&\ddot{\phi}+P_{\phi}^{2}\phi=\mu\Phi_{\phi}\left(\xi,\zeta,\theta,\phi,\varphi,\dot{\theta},\dot{\phi},\dot{\varphi},\ddot{\xi},\ddot{\zeta},\ddot{\theta},\ddot{\phi},\ddot{\varphi},t\right);\\
&\ddot{\varphi}+P_{\varphi}^{2}\varphi=\mu\Phi_{\varphi}\left(\theta,\phi,\dot{\theta},\dot{\phi},\dot{\varphi},\ddot{\theta},\ddot{\phi},\ddot{\varphi},t\right)+F_{\varphi}\cos\left(\omega t+\pi\right).
\end{aligned}\qquad(1)$$

Let us consider the cases of combination resonances, when the resonance relations include two unperturbed coordinates. To this end, asymptotic solutions are found for system (1) by the method of averaging [2].

Assuming $\mu=0$, the solutions of system (1) are found in the form

$$\xi=C_{\xi}e^{iP_{\xi}t}+D_{\xi}e^{-iP_{\xi}t};$$

$$\dot{\xi}=iP_{\xi}\left(C_{\xi}e^{iP_{\xi}t}-D_{\xi}e^{-iP_{\xi}t}\right);$$

$$\eta=C_{\eta}e^{iP_{\eta}t}+D_{\eta}e^{-iP\eta t};$$

$$\dot{\eta}=iP_{\eta}\left(C_{\eta}e^{iP_{\eta}t}-D_{\eta}e^{-iP_{\eta}t}\right);$$

$$\zeta = C_\zeta e^{iP_\zeta t} + D_\zeta e^{-iP_\zeta t} + A_\zeta e^{i\omega t} + B_\zeta e^{-i\omega t};$$
$$\dot\zeta = iP_\zeta\left(C_\zeta e^{iP_\zeta t} - D_\zeta e^{-iP_\zeta t}\right) + i\omega\left(A_\zeta e^{i\omega t} - B_\zeta e^{-i\omega t}\right);$$
$$\theta = C_\theta e^{iP_\theta t} + D_\theta e^{-iP_\theta t};\quad \dot\theta = iP_\theta\left(C_\theta e^{iP_\theta t} - D_\theta e^{-iP_\theta t}\right);$$
$$\phi = C_\phi e^{iP_\phi t} + D_\phi e^{-iP_\phi t}; \qquad (2)$$
$$\dot\phi = iP_\phi\left(C_\phi e^{iP_\phi t} - D_\xi e^{-iP_\phi t}\right);$$
$$\varphi = C_\varphi e^{iP_\zeta t} + D_\varphi e^{-iP_\varphi t} - A_\varphi e^{i\omega t} - B_\varphi e^{-i\omega t};$$
$$\dot\varphi = iP_\varphi\left(C_\varphi e^{iP_\varphi t} - D_\varphi e^{-iP_\varphi t}\right) -$$
$$- i\omega\left(A_\varphi e^{i\omega t} - B_\varphi e^{-i\omega t}\right);$$
$$\dot\zeta = iP_\zeta\left(C_\zeta e^{iP_\zeta t} - D_\zeta e^{-iP_\zeta t}\right) + i\omega\left(A_\zeta e^{i\omega t} - B_\zeta e^{-i\omega t}\right).$$

In the solutions of (2), the values C_k, D_k $(k = \xi,\eta,\zeta,\theta,\psi,\varphi)$ are arbitrary constants; ω is the frequency of the external disturbing force, $\sqrt{-1} = \boldsymbol{i}$ is an imaginary unit; A_s, B_s $(s = \zeta,\varphi)$ are the amplitudes of the forced oscillations of the system at $\Phi_\zeta = 0$, $\Phi_\varphi = 0$.

If we put in (2) $C_k = 0, D_k = 0$ $(k = \xi,\eta,\zeta,\theta,\psi,\varphi)$, the initial system (1) will have the following solution:

$$\xi = \eta = \theta = \psi = 0, \qquad \dot\xi = \dot\eta = \dot\theta = \dot\psi = 0 \qquad (3)$$
$$\zeta = \frac{F_\zeta}{\left(P_\zeta^2 - \omega^2\right)}\cos\omega t; \quad \varphi = \frac{F_\varphi}{\left(P_\varphi^2 - \omega^2\right)}\cos(\omega t + \pi).$$

B. Stability Analysis

Oscillations (3) are provided for by the design of vibratory separators and the technological process. In the following, we will investigate the spatial stability of such oscillations.

We take arbitrary constants C_k, D_k $(k = \xi,\eta,\zeta,\theta,\psi,\varphi)$ as new unknowns instead of $\xi,\dot\xi,\eta,\dot\eta,\zeta,\dot\zeta,\theta,\dot\theta,\phi,\dot\phi,\varphi,\dot\varphi,$ and introduce the replacement of variables (2). Assuming C_k, D_k functions of time t, we differentiate $\dot\xi,\dot\eta,\dot\zeta,\dot\theta,\dot\psi,\dot\varphi$, taken from (2), by t. We obtain the expressions for the second derivatives

$$\ddot\xi = -P_\xi^2\left(C_\xi e^{iP_\xi t} + D_\xi e^{-iP_\xi t}\right) +$$
$$+ iP_\xi\left(\dot C_\xi e^{iP_\xi t} - \dot D_\xi e^{-iP_\xi t}\right);$$
$$\ddot\eta = -P_\eta^2\left(C_\eta e^{iP_\eta t} + D_\eta e^{-iP_\eta t}\right) +$$
$$+ iP_\eta\left(\dot C_\eta e^{iP_\eta t} - \dot D_\eta e^{-iP_\eta t}\right);$$
$$\ddot\zeta = -P_\zeta^2\left(C_\zeta e^{iP_\zeta t} + D_\zeta e^{-iP_\zeta t}\right) +$$
$$+ iP_\zeta\left(\dot C_\zeta e^{iP_\zeta t} - \dot D_\zeta e^{-iP_\zeta t}\right) -$$
$$- \omega^2\left(A_\zeta e^{i\omega t} + B_\zeta e^{-i\omega t}\right). \qquad (4)$$

Solving (4) with respect to $\dot C_k, \dot D_k$, we obtain a system of differential equations in the standard form with respect to the envelope C_k, D_k

$$\dot C_k = \frac{1}{2iP_k} e^{-iP_k t}\left[\mu\Phi_k^*\right];$$
$$\dot D_k = \frac{1}{2iP_k} e^{-iP_k t}\left[\mu\Phi_k^*\right];$$
$$k = \xi,\eta,\xi,\theta,\psi,\varphi. \qquad (5)$$

The right-hand sides of equations (5) are functions of order of smallness μ , and therefore the functions C_k, D_k , $k = \xi,\eta,\xi,\theta,\psi,\varphi$ will be slowly changing functions.

Approximate values of C_k, D_k , as functions of time are determined from the auxiliary equations obtained by averaging equations (5) over time *t*, which is explicitly included in these equations. These auxiliary equations have the following form in the first approximation

$$\dot C_k = \frac{\mu}{2iP_k}\times$$
$$\times \lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T \Phi_k^*\left(C_\xi,\ldots,C_\varphi,D_\xi,\ldots,D_\varphi\right)e^{-iP_k t}dt; \qquad (6)$$
$$\dot D_k = \frac{\mu}{2iP_k}\times \lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T \Phi_k^*\left(C_\xi,\ldots,C_\varphi,D_\xi,\ldots,D_\varphi\right)e^{iP_k t}dt.$$

Equations (6) are used to study the spatial stability of vibrations of the working body of a vibration separator in the presence of resonant ratios between the natural frequencies of the oscillating system P_k $(k = \xi,\eta,\theta,\psi)$ and the frequencies ω of an external force.

IV. Conclusions

Resonance relations, which contain the sum of two frequencies of the oscillating system and the frequency of the external force, are considered. It is proved that at the considered resonance relations the planned technological process will not be disturbed.

References

[1] N.V. Smetankina, O.V. Postnyi, S.Yu. Misura, A.I. Merkulova and D.O. Merkulov Optimal design of layered cylindrical shells with minimum weight under impulse loading. In: 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. P. 506–509.

[2] N. N. Bogoliubov and Y. A. Mitropolski, Asymptotic Methods in the Theory of Non-Linear Oscillations. - New York : Gordon & Breach Science Publishers, 1961, 537 p.

MCIT Modeling, control & information technologies

Mathematical Modeling of Rooftop Solar Energy Potential Using Geospatial and AI-Based Approaches

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.083

Petro Topylko
Department of Applied Mathematics
Lviv Polytechnic National University (LPNU)
Lviv, Ukraine
petro.i.topylko@lpnu.ua

Artur Dankanych
Department of Applied Mathematics
Lviv Polytechnic National University (LPNU)
Lviv, Ukraine
artur.o.dankanych@lpnu.ua

Abstract— **Floating solar photovoltaic (FPV) systems provide an effective approach to increase renewable energy production while avoiding competition for land resources. This paper introduces a mathematical modeling framework for the automated identification and preliminary assessment of water bodies suitable for FPV deployment. The methodology combines satellite remote sensing data (Sentinel-2, Landsat-8) with geospatial analysis and mathematical modeling techniques. Water bodies are delineated using the Normalized Difference Water Index (NDWI), after which filtering criteria—such as minimum surface area, seasonal stability, vegetation cover, and proximity to infrastructure—are applied. A multi-criteria mathematical scoring model is developed to evaluate and rank the suitability of candidate sites. Preliminary experiments confirm the ability of the proposed model to detect and prioritize high-potential areas, thereby reducing the need for extensive field surveys. The research advances the integration of mathematical modeling and geospatial methods for renewable energy planning, with ongoing work directed toward refining model accuracy and environmental adaptability.**

Keywords— mathematical modeling, floating solar photovoltaic (FPV), geospatial analysis, remote sensing, NDWI, multi-criteria decision analysis, renewable energy planning.

I. Introduction

The transition to renewable energy systems is a cornerstone of global strategies aimed at mitigating climate change and reducing dependence on fossil fuels. Solar photovoltaic (PV) technologies, in particular, have demonstrated remarkable growth due to their scalability and declining costs, contributing significantly to the realization of the United Nations Sustainable Development Goals (SDG 7: Affordable and Clean Energy; SDG 13: Climate Action) [1, 3]. Nevertheless, conventional land-based PV deployment often faces competition for land resources, particularly in densely populated or agriculturally intensive regions [3]. To address this limitation, floating solar photovoltaic (FPV) systems have emerged as an innovative solution, offering dual benefits of renewable electricity generation and water resource management through reduced evaporation and enhanced module efficiency due to natural cooling [3].

While FPV systems are increasingly recognized as a no-regret option for sustainable energy transitions, their large-scale deployment is constrained by the absence of systematic frameworks for site identification and evaluation. The spatial distribution, seasonal stability, and ecological sensitivity of water bodies introduce complex decision parameters, requiring approaches that extend beyond purely technical feasibility studies. In this regard, mathematical modeling integrated with geospatial analysis and artificial intelligence (AI) provides a robust pathway to quantify and optimize FPV potential. Recent advances in remote sensing—such as the use of Sentinel-2 and Landsat data with spectral indices like the Normalized Difference Water Index (NDWI) — enable efficient delineation of water surfaces [2, 4]. Complementary methodologies, including semantic segmentation [2, 4], 3D roof reconstruction [6], and digital surface model generation [5], have proven effective for rooftop PV studies and can be adapted to aquatic environments to ensure precise assessment of FPV opportunities.

Building on these insights, this research proposes a modeling-based framework for the automated detection and evaluation of water bodies suitable for FPV deployment. The novelty lies in the integration of multi-criteria mathematical modeling, combining remote sensing inputs, environmental constraints, and infrastructural proximity into a unified scoring system. This approach not only reduces reliance on costly field surveys but also enhances reproducibility and scalability, making it suitable for national and regional energy planning [1, 3, 5].

II. Methodology

The methodology developed in this study is structured to combine remote sensing data, geospatial analysis, and mathematical modeling in order to create a robust framework for identifying and ranking water bodies suitable for floating photovoltaic (FPV) deployment. The workflow consists of four interrelated stages: (i) data acquisition, (ii) water body delineation, (iii) filtering and classification, and (iv) multi-criteria suitability modeling.

A. Data acquisition

Satellite imagery from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI was selected as the primary data source, since

both missions provide global coverage, high revisit frequency, and appropriate spectral bands for water monitoring. These datasets have already demonstrated high efficiency in studies related to urban and rooftop solar assessments, where reliable and large-scale inputs are required [1, 3]. In addition, ancillary geospatial layers such as transportation networks and settlement footprints were included to assess the accessibility of candidate sites and their integration into existing energy systems [3].

B. Water body delineation

To extract water bodies from multispectral imagery, the Normalized Difference Water Index (NDWI) was applied. This index, based on the contrast between green and near-infrared bands, is widely recognized for its ability to enhance water features while suppressing vegetation and built-up areas [2]. To improve reliability, temporal composites were generated to reduce the impact of clouds, atmospheric noise, and seasonal fluctuations in reflectance. Such strategies mirror established practices in rooftop solar potential estimation, where composite imagery increases detection robustness [1].

C. Filtering and classification

Following the initial delineation, potential sites were filtered according to several criteria: minimum surface area, seasonal stability, vegetation encroachment, and proximity to infrastructure. These conditions are consistent with sustainability requirements and technical limitations of FPV deployment, reflecting methodologies previously validated in large-scale rooftop PV assessments [1, 3]. For boundary refinement and classification of ambiguous pixels, recent advances in semantic segmentation were integrated into the workflow [2, 4]. These techniques, successfully used for roof detection and land cover classification, improve the spatial precision of delineated water bodies, ensuring that only viable surfaces are retained for further analysis.

D. Multi-criteria suitability modeling

The final stage involves the development of a mathematical multi-criteria decision model that integrates geospatial indicators into a unified scoring system. The model assigns weights to parameters such as surface area, solar irradiation potential, hydrological stability, and infrastructural accessibility. This approach draws on methodologies applied in rooftop and distributed PV studies [1, 3, 5] but adapts them to aquatic environments. Furthermore, concepts from 3D reconstruction and digital surface model generation [5, 6] were considered to strengthen the framework, highlighting opportunities for extending rooftop-based modeling approaches to FPV systems. The resulting suitability index provides a reproducible, scalable, and transparent tool for prioritizing water bodies at both regional and national levels. First, confirm that you have the correct template for your paper size. This template has been tailored for output on the A4 paper size.

III. Results and Discussions

The developed methodology was applied to a pilot region characterized by a combination of large reservoirs, small ponds, and diverse infrastructural conditions. The main aim of this application was to test the ability of the workflow to generate reproducible results that could support decision-making in FPV deployment. Sentinel-2 imagery served as the primary data source, and the NDWI index was used to delineate water bodies. This approach allowed the removal of seasonal fluctuations and provided stable outlines of permanent water surfaces. Additional filtering eliminated waterlogged fields and artificial irrigation basins that, while detectable in single-date imagery, are not suitable for solar installations.

The outcome of this detection and filtering process is presented in Figure 1, which shows a section of the study area with identified water bodies. The figure highlights how unsuitable objects (such as temporary wetlands and very small ponds) were removed, while large and stable reservoirs remained available for subsequent evaluation.



Figure 1. Example of delineated water bodies suitable for FPV deployment (Sentinel-2 composite, pilot region)

The analysis of Figure 1 demonstrates that the NDWI-based approach is robust in terms of capturing the true spatial extent of water surfaces, even in landscapes with complex land cover. It is particularly important that the integration of seasonal composites minimized false positives: temporary water bodies caused by heavy rainfall events were excluded. Moreover, the boundaries of detected reservoirs were more precise when compared to manual mapping, as vegetation shadows and built-up areas were effectively filtered out. This confirms that the method can be scaled for larger territories without significant loss of accuracy.

After detection, the candidate sites were systematically evaluated according to their morphometric parameters. These included area, stability, and vegetation encroachment, which are critical for the

technical feasibility of FPV deployment. The results are summarized in Table 1.

TABLE I. MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF SELECTED WATER BODIES.

Site ID	Area, ha	Stability, %	Vegetation cover, %
WB-01	145	92	4
WB-02	110	88	7
WB-03	78	85	10
WB-04	52	80	15
WB-05	37	77	18

Table 1 shows clear differences in hydrological suitability among the candidate sites. The two largest reservoirs (WB-01 and WB-02) not only have significant surface area but also exhibit very high seasonal stability (above 88%). Their low vegetation presence (<10%) suggests that the effective usable area for solar panel deployment is maximized. Site WB-03, while smaller, maintains acceptable stability but shows moderate vegetation encroachment, which would reduce the available space for FPV installation. WB-04 and WB-05 represent the least promising cases: their small size, coupled with high vegetation presence (15–18%), substantially limits their technical potential. This analysis indicates that morphometric characteristics alone can eliminate unsuitable sites and prioritize the most promising ones.

However, morphometric suitability is not sufficient for practical deployment. Infrastructure accessibility, especially proximity to the electricity grid, is equally critical. To capture this dimension, additional evaluation was performed, and the results are summarized in Table 2, which includes distance to the grid, integrated suitability scores, and final ranking.

TABLE II. INFRASTRUCTURE PARAMETERS AND SUITABILITY RANKING OF SELECTED WATER BODIES.

Site ID	Distance to grid, km	Suitability score	Rank
WB-01	1.8	0.87	1
WB-02	2.3	0.81	2
WB-03	3.1	0.76	3
WB-04	4.2	0.69	4
WB-05	5.0	0.63	5

Table 2 highlights the decisive role of infrastructure in shaping the final ranking. WB-01 stands out as the best candidate, not only due to its large area and high stability but also because of its short distance (1.8 km) to the grid. This combination explains why it achieved the highest suitability score of 0.87. WB-02 also performed strongly, confirming that both size and accessibility drive high potential. WB-03 occupies a middle position, reflecting its moderate distance to infrastructure and average vegetation presence. By contrast, WB-04 and especially WB-05 were penalized by their remoteness from the grid (over 4 km), which significantly lowers their economic viability, despite acceptable hydrological conditions.

Taken together, the two tables confirm that the joint evaluation of hydrological and infrastructural parameters provides a balanced picture of FPV suitability. If only morphometric data were considered, WB-03 could have been ranked higher; however, when accessibility is integrated, its relative importance decreases. Similarly, WB-05 demonstrates that even relatively stable ponds are poor candidates if located far from energy infrastructure.

The results clearly show that the proposed methodology enables an objective, transparent, and scalable assessment of FPV potential. The combined use of NDWI-based detection, seasonal composites, and multi-criteria scoring ensures that unsuitable sites are systematically excluded while the most promising water bodies are prioritized. By presenting results in both graphical (Figure 1) and tabular forms (Tables 1 and 2), it becomes evident that FPV planning must rely on both morphometric and infrastructural dimensions to ensure realistic and sustainable deployment scenarios.

REFERENCES

[1] Q. Li, S. Krapf, L. Mou, Y. Shi, and X. X. Zhu, “Deep learning-based framework for city-scale rooftop solar potential estimation by considering roof superstructures,” *Applied Energy*, vol. 374, p. 123839, 2024.

[2] S. Rivier, C. Hinojosa, S. Giancola, and B. Ghanem, “Efficient semantic segmentation for aerial imagery using query points and superpixel supervision,” *arXiv preprint arXiv:2309.05490*, 2024.

[3] C. Winkler, K. Dabrock, S. Kapustyan, C. Hart, H. Heinrichs, J. M. Weinand, J. Linßen, and D. Stolten, “High-resolution rooftop photovoltaic potential assessment for a resilient energy system in Ukraine,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 28, p. 101242, 2025.

[4] E. Guérin, K. Oechslin, C. Wolf, and B. Martinez, “Satellite image semantic segmentation,” *arXiv preprint arXiv:2110.05812*, 2021.

[5] V. Batchu, A. Wilson, B. Peng, C. Elkin, U. Jain, C. Van Arsdale, R. Goroshin, and V. Gulshan, “Satellite sunroof: High-res digital surface models and roof segmentation for global solar mapping,” *arXiv preprint arXiv:2408.14400*, 2024.

[6] J. Lussange, M. Yu, Y. Tarabalka, and F. Lafarge, “3D detection of roof sections from a single satellite image and application to LOD2-building reconstruction,” *arXiv preprint arXiv:2307.05409*, 2023.

MCIT Modeling, control & information technologies

Predictive Simulation of the Human Sit-to-Stand Transition

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.084

Mykhailo Tys
Department of Applied Mathematics
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
mykhailo.a.tys@lpnu.ua

Oleksandr Vyshnevskyi
Department of Technical Mechanics and Engineering Graphics
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
oleksandr.i.vyshnevskyi@lpnu.ua

Bohdan Markovych
Department of Applied Mathematics
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
bohdan.m.markovych@lpnu.ua

Vitaliy Korendiy
Department of Technical Mechanics and Engineering Graphics
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
vitalii.m.korendii@lpnu.ua

***Abstract*—The sit-to-stand transition is a fundamental human movement, the performance of which serves as a critical biomarker for functional independence, particularly in aging and clinical populations. Difficulties in executing this mechanically demanding task are associated with decreased mobility, increased risk of institutionalization, and higher mortality rates. While experimental studies have provided foundational knowledge, computational simulation has emerged as an indispensable tool for non-invasively probing the internal biomechanics and neuromuscular control strategies governing this movement. Predictive simulations, in particular, offer the unique capability to establish causal relationships between neuromuscular deficits and functional impairments, and to design and evaluate interventions in silico.**

Keywords—neuromuscular control strategy, mobility, simulation, human movement, biomechanics.

I. Introduction

The ability to rise from a chair is a seemingly simple action, yet it represents a complex and mechanically demanding task that is foundational to human mobility and independence. The sit-to-stand (STS) movement is not merely a mechanical action but a critical biomarker of an individual's functional health. Its successful execution underpins a vast range of daily activities, and its degradation is a powerful indicator of underlying neuromuscular decline. This paper establishes the profound scientific and clinical importance of studying the STS transition, framing it as a cornerstone of functional assessment and a prime target for computational biomechanical analysis.

The STS movement is one of the most frequently performed and biomechanically challenging activities of daily living (ADL) [1]. Adults rise from a seated position an average of 60 times per day, making the successful and efficient performance of this task essential for an active life [2]. The STS transition is a prerequisite for ambulation, often serving as the initiation phase for the sit-to-walk movement, which is crucial for navigating one's environment. The ability to perform an STS movement is considered a key determinant of a person's overall functional level [3]. Consequently, the inability to perform this basic skill has severe consequences. It is directly linked to a loss of independence, impaired functioning in other ADLs, and can be a precipitating factor for institutionalization, particularly among the elderly. In the most severe cases, the failure to rise from a chair is associated with an increased risk of mortality, underscoring its status as a vital sign of physiological resilience [3].

Traditional experimental studies, while foundational, have inherent limitations. They can be tedious, time-consuming, and difficult to adapt for systematic cause-and-effect analysis [4]. Furthermore, they are often restricted to measuring external variables like kinematics and ground reaction forces. Neuromusculoskeletal simulation provides a powerful complement, offering a non-invasive window into the internal biomechanics of movement. These computational models allow for the calculation of variables that are difficult or impossible to measure directly in vivo, such as the forces generated by individual muscles, the stretch of tendons, and the contact forces acting on joint surfaces [2].

The field of biomechanics is currently undergoing a significant evolution, shifting from a primarily descriptive science focused on measuring and characterizing how people move, to a predictive science capable of simulating how they will move under novel or altered conditions. Early biomechanical studies of the STS movement focused on providing kinematic descriptions of the typical movement pattern [5]. While valuable, this descriptive approach cannot explain the causal mechanisms underlying the movement or predict how it would change in response to an intervention. Predictive simulations, in contrast, can establish causal

relationships between neural control inputs, muscle force-generating capacity, and overall task performance [6]. By systematically altering parameters within a validated model – for example, by simulating the effects of a specific muscle's weakness or the addition of an assistive device – researchers can conduct powerful "what-if" analyses [2]. This predictive capability is the cornerstone of modern computational biomechanics and is essential for designing targeted rehabilitation strategies, optimizing assistive technologies, and personalizing clinical treatments [7].

II. Biomechanical Foundations of the Sit-to-Stand Movement

A robust simulation of the STS movement must be grounded in a thorough understanding of its underlying physics. The execution of this task is governed by a set of well-defined mechanical principles and is highly sensitive to a range of external and internal factors. This section delves into the key biomechanical determinants that shape the STS movement, reviews the common approaches to deconstructing it into phases, and highlights a gap in methodological standardization that currently hinders progress in the field.

A. Kinematic and Kinetic Determinants

Decades of experimental research have identified several key determinants that strongly influence the strategy and success of an STS movement. These factors are not merely environmental conditions but are often used as control variables by individuals to modulate the mechanical demands of the task, ensuring that the required joint moments remain within their physiological capacity.

The three most influential external determinants are chair seat height, the use of armrests, and the position of the feet [3]: chair height, armrest use, foot position.

The height of the seat has a profound impact on the joint moments required for the transition. Using a higher chair seat can reduce the peak extension moment required at the knee by up to 60% and at the hip by up to 50%.3 Conversely, lowering the chair seat substantially increases the muscular demand, forcing an individual to either generate greater momentum through more vigorous trunk flexion or to reposition their feet posteriorly to gain a mechanical advantage [3]. For individuals with muscle weakness, such as the elderly, a low chair can make the task impossible without compensation.

The use of armrests provides a direct way to offload the lower limbs. Pushing off with the arms can reduce the required hip extension moment by as much as 50%, effectively supplementing the force generated by the leg extensors [3].

The anteroposterior position of the feet relative to the chair is a critical strategic variable. Repositioning the feet posteriorly (i.e., tucking them further under the chair) dramatically reduces the horizontal distance between the body's center of mass (COM) and the ankle joints at the point of lift-off. This change in leverage significantly decreases the required hip extension moment. One study documented a reduction in the maximum mean hip extension moment from 148.8 N·m to just 32.7 N·m when the foot position was shifted from anterior to posterior [3].

In addition to these external factors, the manner in which the movement is performed – specifically its speed and smoothness – also dictates its biomechanical characteristics. The stand-to-sit (StandTS) movement, which involves eccentrically controlling the body's descent, is particularly sensitive to these variables. Slower and smoother StandTS movements demand greater controlled eccentric work from the knee and hip extensor muscles to absorb and manage the body's falling momentum. This increased muscular control is associated with reduced postural sway, indicating enhanced stability [8].

B. Phasic Deconstruction of the STS Movement

To facilitate analysis, the continuous STS movement is typically deconstructed into a series of discrete phases. This partitioning allows researchers to isolate and study specific biomechanical events and neuromuscular strategies. The most frequently cited framework is the four-phase model proposed by Schenkman and colleagues [3]:

1) Phase I (Flexion-Momentum). This preparatory phase begins with the initiation of movement and is characterized by the forward flexion of the trunk. This action serves to move the body's COM forward, positioning it over the base of support (the feet) in anticipation of lift-off. This phase concludes at the instant just before the buttocks are lifted from the seat.

2) Phase II (Momentum-Transfer). This phase begins with "seat-off", the moment the buttocks leave the chair. The horizontal momentum generated during Phase I is transferred into vertical momentum to lift the body. This is a critical and unstable phase of the movement. It ends when the ankle joint reaches its maximal dorsiflexion angle.

3) Phase III (Extension): This phase begins just after maximum ankle dorsiflexion. It is characterized by the coordinated extension of the hip and knee joints, which raises the body's COM to its highest point. The trunk also extends to an upright posture. This phase concludes when the hips cease to extend.

4) Phase IV (Stabilization). In this final phase, any remaining oscillations are dampened as the body achieves a stable standing posture.

While the four-phase model is widely used, it is not the only one. Other researchers have proposed models with two, three, or five phases, depending on the specific research question and measurement techniques employed [9]. The simplest deconstruction involves just two phases, using the single event of seat-off as the demarcation point between the preparatory phase and the rising phase [10].

III. Results and Discussion

A. Results of Studying the Sit-to-Stand Movement

The plot in Fig. 1 shows synthetic hip, knee, and ankle joint angles over a 3-second sit-to-stand. Hip and knee extend smoothly from a seated posture toward full extension; the ankle changes modestly, reflecting a relatively smaller range of motion in this simplified scenario. Hip extension starts around a seated angle (about 90°) and increases smoothly toward standing, mirroring the trunk's forward lean followed by strong hip extension. The smooth S-shape suggests a controlled acceleration and deceleration, typical of comfortable-speed STS. Knee extension follows a similar trajectory to the hip, reflecting coordinated extensor action. In many real trials, knee extension peaks slightly after hip extension onset as people "release" the seat; the plot captures the overall rise to full extension without abrupt transitions. Ankle behavior shows a modest increase and stabilization, consistent with mild dorsiflexion near seat-off and limited plantarflexion near the end. In some cases, ankle excursions can be larger with low seats, fast rises, or balance-challenging conditions.

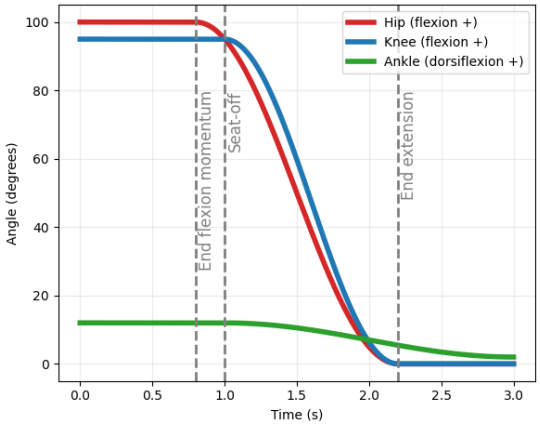


Figure 1. Sit-to-stand joint angles over time (flaxion positive convention)

B. Biomechanical Insights

People typically generate forward momentum with trunk flexion, then transfer momentum vertically at seat-off via hip and knee extensors. The ankle modulates the center of pressure for balance.

Forward trunk lean reduces the horizontal distance between center of mass (COM) and feet, minimizing required knee torque at seat-off. A delayed or insufficient lean often increases knee demand.

Hip and knee show the largest extensor moments and peak power during momentum transfer. Ankle contributes to balance and subtle propulsion rather than primary lifting.

Prolonged knee flexion, reduced hip extension range, or excessive ankle strategy can indicate weakness, pain avoidance, or balance impairment. Asymmetries between legs or irregular velocity profiles may reveal compensation patterns.

C. MapleSim Model of the Human Lower Limbs

The MapleSim environment allows for representing the human lower limbs as a multibody system with joints, rigid segments, and control inputs.

The model includes the foot, shank, thigh, and pelvis, each defined as a solid body with appropriate geometric and mass properties. These segments are assembled in the sagittal plane to reproduce the anatomical arrangement of the ankle, knee, and hip joints. By constraining the degrees of freedom of each joint to flexion and extension, the model captures the essential kinematics of the lower extremities during functional tasks such as sit-to-stand or gait.

The hip joint is modeled as the connection between the pelvis and the femur, allowing controlled rotation that simulates hip flexion and extension. The knee joint links the femur and tibia, reproducing the hinge-like motion of the quadriceps mechanism. The ankle joint connects the tibia to the foot segment, enabling dorsiflexion and plantarflexion. Each joint can be driven by torque actuators or prescribed motion profiles, allowing the simulation of muscle forces and coordination strategies. The use of MapleSim software enables the calculation of joint angles, angular velocities, and reaction forces, which can then be compared with experimental biomechanical data.

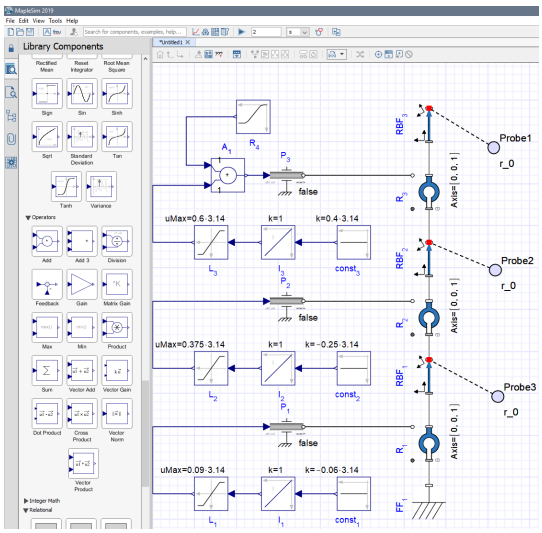


Figure 2. MapleSim model of the human lower limbs

The model also incorporates reference planes and markers that represent anatomical landmarks, such as the hip center, knee axis, and ankle axis. These markers allow the trajectories of the joints and the center of mass of the trunk to be visualized relative to the initial seated posture. The structural alignment of the tibia, femur, and spine in the sitting position serves as the baseline configuration, from which the dynamic transition to standing is simulated. By analyzing the resulting motion paths, researchers can study the coordination of the lower limbs, the distribution of joint torques, and the strategies used to maintain balance.

Through this MapleSim representation, the lower limb system becomes a virtual prototype that can be adapted to different anthropometric parameters, seat

heights, or movement speeds. It provides a powerful tool for exploring the biomechanics of human movement, supporting applications in rehabilitation engineering, prosthetics design, and the study of pathological gait or sit-to-stand impairments.

D. Simulation of the Sit-to-Stand Process

Fig. 2 illustrates the trajectories of three key body landmarks during the sit-to-stand transition. The red, blue, and green curves correspond to the knee, hip, and trunk's center of mass, respectively, plotted within the vertical (sagittal) plane. Each curve traces the displacement of the respective point from the initial seated posture through to the final upright stance. The black reference line denotes the initial (boundary) structural alignment of the tibia, femur, and spine in the sitting position, serving as a baseline against which subsequent motion can be evaluated. The forward and downward excursion of the hip and trunk's center of mass prior to seat-off reflects the flexion-momentum phase, during which the body shifts its center of mass over the feet. The subsequent upward and posterior arcs of the hip and trunk curves indicate coordinated extension of the hip and knee joints, while the knee trajectory demonstrates a forward-then-upward path consistent with shank inclination followed by knee extension. The relative compactness of the knee and hip paths compared to the larger excursion of the trunk's center of mass highlights the role of proximal joint extension in elevating the body. Together, these trajectories capture the sequential strategy of momentum generation, transfer, and stabilization that characterizes a typical sit-to-stand movement, and they provide a spatial reference for analyzing joint coordination, balance control, and potential deviations in clinical populations.

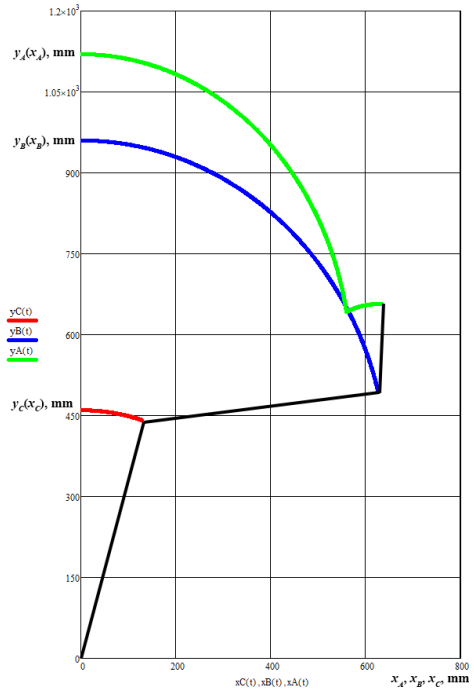


Figure 3. Motion paths of the three key body landmarks during the sit-to-stand transition: red curve – knee point; blue curve – hip point; green curve – trunk's center of mass

IV. Conclusions

This paper has underscored the sit-to-stand transition as a critical biomarker of functional independence and has demonstrated the utility of predictive simulation as a tool for its biomechanical analysis. The STS movement, while fundamental to daily living, is a mechanically demanding task whose degradation is linked to significant declines in mobility and quality of life, particularly in aging and clinical populations.

Through a review of the foundational biomechanics, key determinants such as chair height, armrest use, and foot position were identified as critical modulators of the task's mechanical demands. The development and simulation of a multibody model of the human lower limbs in MapleSim reproduced the characteristic kinematics of the STS movement. The visualized trajectories of the hip, knee, and the trunk's center of mass provide a clear quantitative representation of the complex coordination strategy, aligning with the established sequential phases of flexion-momentum, momentum transfer, extension, and stabilization.

The results affirm that computational modeling provides a powerful, non-invasive method to probe the internal dynamics of this fundamental movement. Such models serve as a virtual prototype for conducting "what-if" analyses, which are essential for designing targeted rehabilitation strategies, optimizing assistive technologies, and personalizing clinical treatments for individuals with impaired mobility.

References

[1] J. Li *et al.*, "Kinematic analysis of the human body during sit-to-stand in healthy young adults," *Medicine (Baltimore).*, vol. 100, no. 22, p. e26208, Jun. 2021, doi: 10.1097/MD.0000000000026208.

[2] E. van der Kruk and T. Geijtenbeek, "A planar neuromuscular controller to simulate compensation strategies in the sit-to-walk movement," *PLoS One*, vol. 19, no. 6, p. e0305328, Jun. 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0305328.

[3] W. G. Janssen, H. B. Bussmann, and H. J. Stam, "Determinants of the sit-to-stand movement: A review," *Phys. Ther.*, vol. 82, no. 9, pp. 866–879, Sep. 2002, doi: 10.1093/ptj/82.9.866.

[4] B. Ozsoy and J. Yang, "Simulation-based unassisted sit-to-stand motion prediction for healthy young individuals," in *Volume 6: 10th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control*, American Society of Mechanical Engineers, Aug. 2014. doi: 10.1115/DETC2014-34231.

[5] S. Nuzik, R. Lamb, A. VanSant, and S. Hirt, "Sit-to-stand movement pattern," *Phys. Ther.*, vol. 66, no. 11, pp. 1708–1713, Nov. 1986, doi: 10.1093/ptj/66.11.1708.

[6] R. R. Neptune, C. P. McGowan, and S. A. Kautz, "Forward dynamics simulations provide insight into muscle mechanical work during human locomotion," *Exerc. Sport Sci. Rev.*, vol. 37, no. 4, pp. 203–210, Oct. 2009, doi: 10.1097/JES.0b013e3181b7ea29.

[7] T. K. Uchida, A. Seth, S. Pouya, C. L. Dembia, J. L. Hicks, and S. L. Delp, "Simulating ideal assistive devices to reduce the metabolic cost of running," *PLoS One*, vol. 11, no. 9, p. e0163417, Sep. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0163417.

[8] D. Cabrera and K. Smith, "The influence of smoothness and speed of stand-to-sit movement on joint kinematics and kinetics during stand-to-sit," *International Journal of Exercise Science: Conference Proceedings*, vol. 2, no. 16, Art. 57, 2024.

[9] C. Pinheiro *et al.*, "Kinematic and kinetic study of sit-to-stand and stand-to-sit movements towards a human-like skeletal model," in *2019 IEEE 6th Portuguese Meeting on Bioengineering (ENBENG)*, IEEE, Feb. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/ENBENG.2019.8692569.

[10] C. V. Mihova, "Sit-to-stand biomechanics: A systematic review," M.S. report, Dept. Kinesiology and Health Education, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX, 2021 [Online]. Available: https://repositories.lib.utexas.edu/items/f2284fee-d008-4e98-837a-650203c27efb.

Аналіз та використання фізичних моделей для симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.085

Віктор Биков
Національний університет водного господарства та природокористування, НУВГП
Рівне, Україна
v.o.bykov@nuwm.edu.ua

Наталія Жуковська
Національний університет водного господарства та природокористування, НУВГП
Рівне, Україна
n.a.zhukovska@nuwm.edu.ua

Анотація – **В роботі розглянуто три фізичні моделі для симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях. порівняння їх між собою, наведення переваг та недоліків кожного. Описано та наведено ймовірну реалізацію розглянутих методів за допомогою програмного коду.**

Ключові слова —XPBD (Extended Position-Based Dynamics); MPM; Модель Біо (модель пороеластичності); Unity3D, Unreal Engine, симуляція; комп'ютерне моделювання; ігрові рушії.

I. Вступ

Відтворення достовірної симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ у реальному часі має дуже велике значення для будівельної інженерії, навчальної та науково-дослідницьких галузях. Також достовірність відтворюваності даних процесів можна використати у розважальних цілях, імплементувавши моделювання таких явищ у відеоігри за допомогою ігрових рушіїв та додаткових фізичних плагінів. Такий підхід значно посилить імерсивний досвід гравця та виокремить даний продукт з поміж інших проєктів. Проте, реалізація комп'ютерного моделювання описаного явища потребує значних обчислювальних потужностей, і тому в даному випадку варто краще підійти до реалізації симуляції через вибір фізичної моделі та її реалізації за допомогою програмного коду та можливостей ігрових рушіїв з використанням фізичних плагінів. В роботі наведено три можливі реалізації комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану пористих середовищ, їх можлива реалізація, переваги та недоліки кожного з них.

II. Мета та завдання дослідження

Метою та завданням дослідження даної роботи є наступне:

- Представити три фізичні моделі, за допомогою яких можна наочно представити симуляцію напружено-деформованого стану пористих середовищ через ігрові рушії.
- Описати наявні моделі та проаналізувати їх.
- Вивести переваги та недоліки кожної фізичної моделі.
- Обрати найбільш точну модель для подальшої розробки симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в обраному ігровому рушії.

III. Основні результати

Для симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях потрібна фізична модель, яка буде опрацьовувати вхідні параметри та відображати в реальному часі результати природних процесів через візуальне зображення, виведене з ігрового рушія. Для цієї реалізації було вибрано три моделі з різними рівнями достовірного фізичного представлення, а саме: метод частинок, MPM (Material Point Method) / APIC(Affine Particle-In-Cell), SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) [3][4]; XPBD (Extended Position-Based Dynamics) / PD (Projective Dynamics) [5]; модель Біо (модель пороеластичності) [1].

Дані моделі були обрані як оптимальні варіанти для реалізації відтворення вищеописаних процесів, які мають максимальну точність у відтворюванні фізичних явищ в пористих середовищах [7]. Проаналізуємо кожну з моделей.

1) Метод частинок, MPM (Material Point Method) / APIC(Affine Particle-In-Cell), SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics): моделювання твердих, сипучих тіл або рідин, де основним обчислювальними одиницями є частинки, а не вузлові сітки, які представлені у класичних методах як FEM (Finite Element Method) чи FVM (Finite Volume Method). Метод та його розширення моделюють тверде або пружне середовище як набір частинок, які зберігають свою сукупність, масу, деформацію та швидкість. Обчислення сил та зміщень представлені на тимчасовій сітці. Для рідкої фази використовується SPH, де рідину представляють як сукупність частинок, які взаємодіють через згладжені ядра. Перевагою

такого методу можуть бути висока фізична точність, може моделювати великі деформації, обвали, витікання рідин з твердих середовищ [3]. Даний метод не потребує фіксованої сітки, тобто він є стійким до топологічних змін. Також цей підхід є універсальним, оскільки можна описати разом тверді, сипучі та рідкі тіла, які опрацьовуються в симуляції. Щодо недоліків, то тут можна вказати наступне: часовий крок симуляції доволі обмежений і не є стабільним, бо зав'язаний умовою Куранта-Фрідріхса-Леві [4]. Калібрування симуляційних явищ даним методом є важким. Тому динамічно міняти параметри складно та доволі ресурсомістко (потрібні великі об'єми обчислювальної потужності CPU та GPU ресурсів) [6]. Також недоліком є складність інтеграції в ігровий рушій (наприклад, Unity, Unreal), через те, що для того, щоб імплементувати його, потрібні фізичні бібліотеки по типу Taichi, Flex або Houdini. Підсумовуючи все вище описане, можна сказати, що даний метод є найточнішим методом, але дуже складний для реалізації моделювання в реальному часі [7].

2) XPBD (*Extended Position-Based Dynamics*) / *PD* (*Projective Dynamics*)*:* методи, орієнтовані під реальний час і які моделюють фізичні явища за допомогоюгеометричних обмежень, а не через класичні рівняння руху рідин. Тверда фаза описується як система точок з обмеженням на об'єм і форму, а порове середовище моделюється через спрощене рівняння дифузії тиску [5]. Перевагами даного методу є саме те, що він є швидким та стабільним під час симуляції напружено-деформованого стану в реальному часі, простіший в інтеграції в ігрові рушії без залучення фізичних плагінів. В плані ресурсності в процесі обчислень не потребує значних потужностей CPU або GPU [6]. До недоліків даного методу можна віднести те, що фізичний процес є дещо спрощеним та наближеним до реальних показників, даний метод не враховує всіх нюансів процесу руху рідин через пористі середовища [7]. Також цей метод не надає точних напружень, а тільки демонструє геометричну поведінку. Таким чином, описаний метод краще підійде для розважальних цілей, де результат симуляції буде швидко опрацьовано та продемонстровано візуально, але точність та достовірність таких симуляцій не є фізично вірною.

3) Модель Біо (*модель пороеластичності*): механіко-математична модель пористого середовища, що поєднує рівняння пружності твердої фази з рівнянням фільтрації рідини (Дарсі) [1]. Вона описує взаємодію рідинного тиску й деформацій каркасу беручи за основу параметри фізичних явищ (модуль Юнга, проникності тощо). Перевагою даного методу є висока точність моделі, порівняно з першим методом [2]. Дана модель враховує велику кількість фізичних параметрів при симуляції, що дає змогу налаштовувати симуляційні процеси гнучкіше та точніше [7]. До недоліків використання можна віднести те, що даний метод є складним для обчислень. Це в свою чергу додасть складнощів реалізувати його в ігрових рушіях, навіть при підключених фізичних плагінах. Також цей метод не підходить для симуляції в реальному часі. Таким чином, даний метод не є пріоритетним при виборі моделі для інтегрування в наявні на сьогодні ігрові рушії.

IV. Обмеження

Всі вищеописані методи мають ряд обмежень, які суттєво можуть вплинути на подальший розвиток наукової роботи. В цьому випадку це потреба в дорогому обладнанні для обчислень симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ у реальному часі. Також існує проблема в складній реалізації інтегрування змодельованих процесів в ігровий рушій через програмний код, оскільки дана реалізація потребує значних навичок та знань для підходів розробки та дизайну програмного коду симуляції фізичних явищ.

V. Висновки

Симуляція напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях можна відтворити багатьма варіантами фізичних моделей. Однак, всі вони, особливо ті, які перераховані в даній роботі, не є ідеальними, адже мають ряд обмежень, як в перспективі технічної реалізації, так і правдивість відтворювання фізичних явищ. Проте, навіть при таких обмеженнях даний напрям в реалізації є перспективним, що може значно вплинути на будівельну, навчальну та науково-дослідницьку галузі. Після огляду та аналізу вищеописаних моделей для подальшої наукової роботи з реалізації симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях в реальному часі було прийнято обрати реалізацію через метод частинок MPM/APIC, SPH, оскільки він є компромісним з поміж всіх описаних, має певну точність у відтворюванні фізичних явищ.

Список використаних джерел

[1] Biot, M. A. General theory of three-dimensional consolidation /Journal of Applied Physics, 1941. 155–164 с.

[2] Biot, M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range / The Journal of the Acoustical Society of America, 1956. 168–178 с.

[3] Monaghan, J. J. Smoothed particle hydrodynamics / Reports on Progress in Physics, 1992. 1557–1571 с.

[4] Bender, J.; Koschier, D.; Teschner, M. Divergence-free Smoothed Particle Hydrodynamics / ACM Transactions on Graphics (TOG), 2020. 97 с.

[5] Macklin, M.; Müller, M. XPBD: Position-Based Simulation of Compliant Constrained Dynamics / Proceedings of the ACM SIGGRAPH Motion in Games, 2016. 49–54 с.

[6] Müller, M.; Heidelberger, B.; Hennix, M.; Ratcliff, J. Position Based Dynamics / Journal of Visual Communication and Image Representation, 2007. 109–118 с.

[7] Nehme, H.; Bender, J.; Koschier, D. Real-time simulation of porous deformable objects using particle-grid hybrids / Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2023. 1–10 с.

MCIT Modeling, control & information technologies

Математичне моделювання впливу забруднення довкілля на епідемічний процес

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.086

Ярослав Бігун
кафедра прикладної математики та інформаційних технологій
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Чернівці, Україна
y.bihun@chnu.edu.ua

Олег Українець
кафедра прикладної математики та інформаційних технологій
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Чернівці, Україна
o.ukrainets@chnu.edu.ua

У роботі запропоновано математичну модель поширення епідемії із врахуванням забруднення довкілля, що може посилити перебіг епідемії. Модель ґрунтується на відомі SIR-моделі, в якій крім інтегрального екологічного фактору $E(t)$, враховано народжуваність і смертність у популяції. Динаміка долі схильного до інфікування населення у моделі залежить від відхилення рівня забруднення від деякого допустимого значення K і втрати імунітету до захворювання через час $\tau > 0$. Час одужання інфікованих осіб зростає із ростом значення $E(t) - K$. Знайдено стани рівноваги та досліджено їх стійкість. Проведено числовий аналіз математичної моделі.

Ключові слова: епідемія, базове репродуктивне число, математична модель, екологічний фактор, стан рівноваги, диференціальні рівняння із запізненням, комп'ютерне моделювання.

Оскільки процес відновлення довкілля найчастіше має коливний характер, який стабілізується відносно значення $E(t) = K$ при $t \to \infty$, то припустимо як в [1], що величина забруднення $E(t)$ є розв'язком рівняння Гачінсона:

$$\frac{dE(t)}{dt} = r\left(1 - \frac{E(t-\Delta)}{K}\right)E(t) \qquad (1)$$

де $0 < r$ – коефіцієнт лінійного росту, запізнення $\Delta > 0$ відображає середній час відновлення екологічного стану до допустимого рівня.

Врахуємо у моделі час $\tau > 0$ втрати імунітету після одужання, як в [2]. Перевищення рівня забруднення $E - K$ веде до збільшення кількості осіб, схильних до інфікування, а також може зрости час одужання після інфікування. Тому, ґрунтуючись на SIR-моделі [3,4], пропонована модель набуває вигляду:

$$\frac{dS(t)}{dt} = b - \beta S(t)I(t) + \alpha I(t-\tau) + \varepsilon(E(t) - K) - \mu S(t), \qquad (2)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma\big(E(t)\big)I(t) - \mu I(t), \qquad (3)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma\big(E(t)\big)I(t) - \alpha I(t-\tau) - \varepsilon(E(t) - K) - \mu R(t). \qquad (4)$$

Тут

$$\gamma(E) = \frac{\gamma_0}{1 + \gamma_1(E(t) - K)}$$

та усі коефіцієнти в моделі – додатні числа.

Якщо початкові умови для системи рівнянь (1) – (4) невід'ємні і виконуються умови:

$$b - \varepsilon\sigma > 0, \sigma = \max|E(t) - K| \text{ при } t \geq 0;$$
$$\alpha(1 + \gamma_1\sigma) < \gamma_0,$$

то доведено, що неперервний розв'язок системи рівнянь (2) – (4) існує при $t > 0$ і невід'ємний.

Стан рівноваги, який відповідає відсутності епідемії, набуває вигляду:

$$I_1 = 0, \quad E_1 = K, \quad S_1 = b/\mu, \quad R_1 = 0, \qquad (5)$$

а стан рівноваги, що відповідає наявності епідемії серед населення наступний:

$$S_2 = \frac{\gamma_0 + \mu}{\beta}, I_2 = \frac{\beta b - \mu(\gamma_0 + \mu)}{\beta(\gamma_0 + \mu - \alpha)}, R_2 = \frac{(\gamma_0 - \alpha)I_2}{\mu}. \qquad (6)$$

Теорема. Нехай виконується умови:

$$\mu(\gamma_0 + \mu) < \beta b,$$
$$0 < 2r\,\Delta < \pi$$

і базове репродуктивне число

$$R_0 = \frac{b\beta}{\mu(\gamma_0 + \mu)} < 1.$$

Тоді стан рівноваги (5) асимптотично стійкий і поширення епідемії не відбувається.

Дослідження стійкості стану рівноваги (6) зводиться до знаходження умов від'ємності коренів характеристичного рівняння

$$\lambda^2 + (\alpha + \mu)\lambda + a(\gamma_0 + \mu - \alpha a e^{-\lambda\tau}) = 0,$$

де $a = \beta I_2$. Зокрема, при $\tau = 0$ (миттєва втрата імунітету) стійкість досягається при виконанні умови

$$\alpha\beta I_2 < \gamma_0 + \mu - \alpha.$$

Проведено комп'ютерне моделювання динаміки поширення епідемії. Нехай запізнення $\Delta = \tau = 1$, якщо імунітет втрачається після одужання через час

τ , то під впливом екологічного фактору з ростом коефіцієнта r спостерігається коливання факторів S, I та R. З часом значення факторів моделі наближаються до стійких станів рівноваги (рис. 1-2),

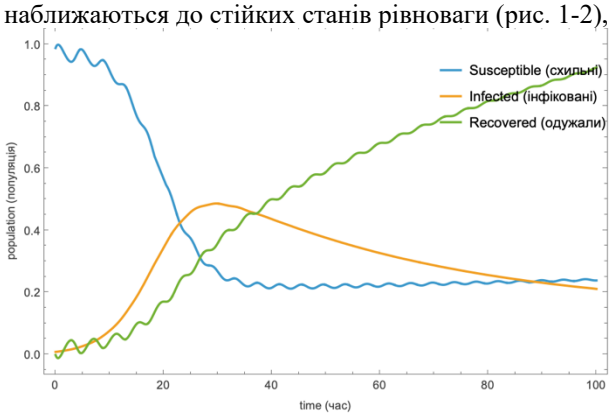


Рисунок 1. Динаміка S, I, R із врахуванням E(t). Параметри: $\beta = 0.3, \gamma_0 = 0.08, \gamma_1 = 0.5, \varepsilon = 0.2, \alpha = 0.05, b = 0.005, \mu = 0.001; S_0 = 0.99, I_0 = 0.01, R_0 = 0, E_0 = 0.5.$

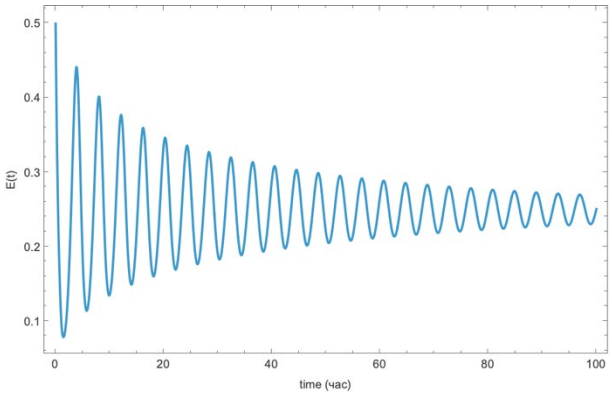


Рисунок 2. Графік розв'язку E(t), $r = 1.53, K = 0.25.$

Якщо $r\Delta = 2 > \pi/2$, то рівновага $E - K$ втрачає стійкість, і розв'язок $E(t)$ набуває коливального характеру (рис. 3-4). Таким чином, дія екологічного фактора $E(t)$ зумовлює періодичні зміни у поведінці розв'язку моделі.

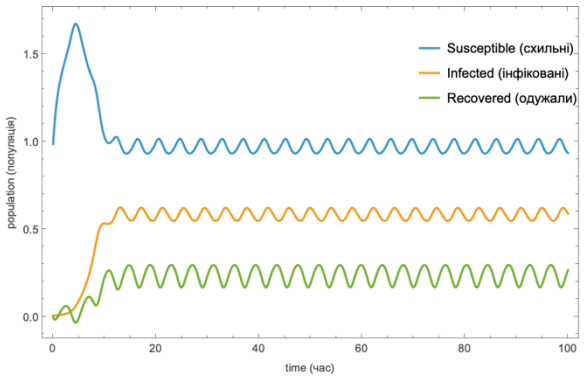


Рисунок 3. Динаміка S, I, R з урахуванням коливної поведінки фактору E(t). Параметри: $\beta = 0.93, \gamma_0 = 0.4, \gamma_1 = 0.79, \varepsilon = 0.35, \alpha = 0.2, b = 0.9, \mu = 0.5, r = 1.7, K = 0.25. S_0 = 0.99, I_0 = 0.01, R_0 = 0, E_0 = 0.5.$

але при цьому залишається доля інфікованих осіб, яка зростає.

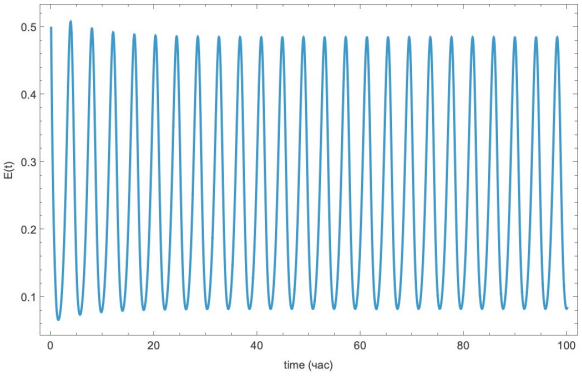


Рисунок 4. Графік розв'язку E(t), $r = 1.5, K = 0.25$

Список використаної літератури

[1] Bihun Y., Ukrainets O. Mathematical modelling of the immune response to infectious diseases with the influence of environmental factors.Acta et Commentationes, Exact and Natural Sciences. 2024. Vol.~18(2). P.~7--17.. London, vol. A247, pp. 529–551, April 1955. (references)

[2] Cooke K., van den Driessche P., Zou X. Interaction of maturation delay and nonlinear birth in population and epidemic models. Journal of Mathematical Biology. 1999. Vol.~39. P.~332--352.I. S. Jacobs and C. P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in Magnetism, vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271–350.

[3] Martcheva M. An Introduction to Mathematical Epidemiology. Springer: New York--Heidelberg--Dordrecht--London, 2015. 453~p.R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev., in press.

[4] Foryś U. Modele matematyczne w epidemiologii i immunologii. Matematyka stosowana. 2000. Nr~1(42). P.~35--67.M. Young, "The Technical Writer's Handbook. Mill Valley," CA: University Science, 1989.

MCIT Modeling, control & information technologies

Моделювання гідродинамічних процесів у водоймах з ділянками поповнення течії

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.087

Андрій Бомба
професор, д. т. н., професор кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики НУВГП
Рівне, Україна
a.ya.bomba@nuwm.edu.ua

Олекса Кушнір
аспірант кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики НУВГП
Рівне, Україна
ol.o.kushnir@nuwm.edu.ua

Дослідження присвячено узагальненню чисельного методу комплексного аналізу моделювання гідродинамічних процесів у водоймах, обмежених лініями втоку-витоку та береговими непроникними лініями. Наведено математичну модель, різницеву схему та алгоритм побудови гідродинамічної сітки і знаходження невідомих величин (потенціалу, функції течії, витрат, а також місцезнаходження ліній розділу течії).

Ключові слова — повільний рух води; ідеальна течія; метод комплексного аналізу; чисельні методи конформних відображень.

I. Загальна постановка та математична модель задачі

Використовуючи фізичні закони, теорію векторних полів та методи комплексного аналізу, в попередніх дослідженнях розглядались математичні моделі повільного руху води в областях, обмежених ділянками втоку-витоку та береговими непроникними лініями. Ці моделі будували для задач із одним, або декількома так званими береговими джерелами. При цьому визначали, як інтенсивність, або потенціал цих джерел впливає на рух води в цих областях.

А в роботі [9] запропоновано підхід до моделювання ідеальної течії у водному середовищі, обмеженому лініями течії та еквіпотенціальними поверхнями, зокрема у водоймі з притоками. Аналіз гідрологічного режиму водного об'єкта вказує на складну взаємодію підземних ґрунтових вод та поверхневих водних мас. У цій роботі вплив як поверхневих так і підземних вод, що підтримують основну течію (наприклад, притоки до водойми), на початковому етапі запропоновано моделювати як ділянки (джерела) поперечних збурень базового стоку. Побудовано алгоритм, що забезпечує можливість знаходити потенціали, а отже і поля швидкості руху, будувати лінії розділу течії та гідродинамічну сітку руху, обчислювати різного роду інтегральні параметри (величини перетоків, витрати тощо).

Ми продовжуємо ці дослідження, розглядаючи водойму з довільною кількість джерел втоку та одним джерелом витоку, при умові, що відсутні перетоки з одного джерела втоку в інше. Аналогічно до попередніх робіт, будується гідродинамічна сітка, і знаходиться потенціал, характеристична функція течії в будь-якій точці області, лінії розділу та витрати з кожного джерела, а також загальна витрата із джерела витоку. Вважається, що вода рухається повільно, зокрема відсутні завихрення і інші джерела поповнення/витоку, поки-що не враховуємо випаровування, фільтрацію, вітер, хвилі тощо.

Розглядається область G_z комплексної площини (z) $(z = x + iy)$, обмежена N ділянками втоку, однією ділянкою витоку, а також береговими непроникними лініями (див. рис. 1), де A_k, $B_k (k = \overline{1,N})$ – крайні точки ділянок втоку, C, D – крайні точки ділянки витоку, K_k $(k = \overline{1,N-1})$ – початкові точки ліній розділу течії, K^k $(k = \overline{1,N-1})$ – відповідні їм кінцеві точки на ділянці витоку CD.

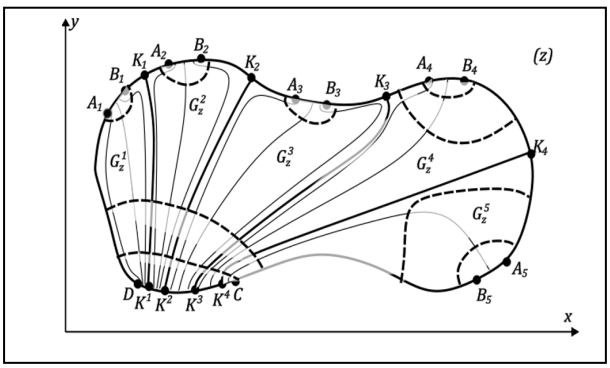


Рис. 1. Фізична область G_z для N=5

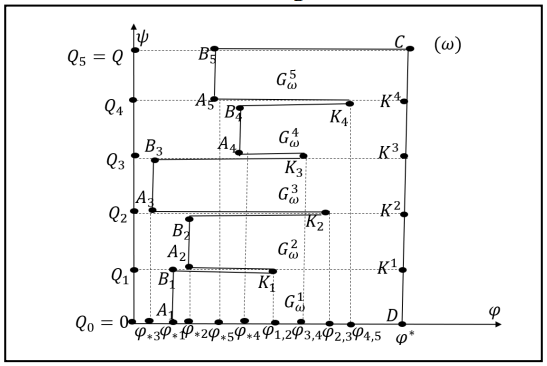


Рис. 2. Область комплексного потенціалу G_ω для N=5

Відповідну область комплексного потенціалу G_ω ($\omega = \varphi + i\psi$, де ψ - відповідна потенціалу φ функція течії) зображено на рис. 2, де через φ_{*k}, φ^* позначено відомі потенціали на кожній з ділянок, $\varphi_{k,k+1}$ – шукані потенціали в точках K_k, Q_1, …, $Q_k - Q_{k-1}$, …, $Q_N - Q_{N-1}$, $Q = Q_N$ – шукані величини відповідних перетоків. Задача (пряма) полягає в знаходженні в G_z розв'язку системи Коші-Рімана: $\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{\partial\psi}{\partial y}$, $\frac{\partial\varphi}{\partial y} = -\frac{\partial\psi}{\partial x}$, за відповідних граничних умов, і зводиться до конформного відображення області G_z на G_ω з відповідністю кутових точок. А остання задача, в свою чергу, зводиться до оберненого конформного відображення (знаходження характеристичної функції течії $z = z(\omega) = x(\varphi,\psi) + iy(\varphi,\psi)$) області G_ω на G_z.

II. Різницева схема, та обчислювальний алгоритм задачі

Аналогічно до [1]-[9], відповідні підобласті комплексного потенціалу G_ω^k покриваємо рівномірними сітками, причому ці підобласті в свою чергу розбиваємо на декілька «підпідобластей» (регіонів) вертикальними прямими, що проходять через точки зі значеннями потенціалів в точках розділу K_k (через $\Delta\varphi_{kp}$ та $\Delta\psi_k$ позначено кроки сітки в p-му регіоні k-ї підобласті).

В процесі ітерацій координати x, y внутрішніх вузлів даної області уточнюємо за формулами: $\begin{cases} x_{k,i,j}^{s+1} = \frac{x_{k,i,j+1}^s + x_{k,i,j-1}^s + \gamma_{k,p}(x_{k,i,j+1}^s + x_{k,i,j-1}^s)}{2(1+\gamma_{k,p})} \\ y_{k,i,j}^{s+1} = \frac{y_{k,i,j+1}^s + y_{k,i,j-1}^s + \gamma_{k,p}(y_{k,i,j+1}^s + y_{k,i,j-1}^s)}{2(1+\gamma_{k,p})} \end{cases}$, де $\gamma_{k,p} = \frac{\Delta\varphi_{k,p}}{\Delta\psi_k}$, s – крок ітерації . При цьому, нами розроблена спеціальна процедура «склеювання» на «стиках» регіонів та підобластей. різні. Різницевий аналог для граничних вузлів будується, використовуючи рівняння межі, та умови ортогональності ліній сітки до межі області.

Алгоритм розв'язку даної задачі:

1. Задаємо рівняння межі області, параметри джерел, кількість вузлів розбиття відповідної області комплексного потенціалу, параметри необхідної точності роботи алгоритму.

2. Задаємо початкове наближення шуканих координат вузлів динамічної сітки.

3. Обчислюємо початкові наближення конформних інваріантів, та кроків сітки, виходячи з міркувань «подібності в малому» відповідних «чотирикутничків» областей G_ω та G_z.

4. Аналогічно до [9], проводимо уточнення внутрішніх, а потім граничних вузлів сітки, з урахуванням спеціальної процедури спряження.

5. Далі циклічно уточнюємо значення конформних інваріантів та кроків сітки. Умовами закінчення процесу можуть бути досягання заданої точності лише на границі заданої області (в силу принципу максимуму для еліптичних систем).

Література

[1] Бомба А.Я., Каштан С.С., Пригорницький Д.О., Ярощак С.В. Методи комплексного аналізу. – Рівне: НУВГП, 2013. – 415 с.

[2] Бомба А.Я., Сінчук А.М., Ярощак С.В. Моделювання фільтраційних процесів у нафтогазових пластах числовими методами квазіконформних відображень. – Рівне: «Асоль», 2016. – 238 с.

[3] Бомба А.Я., Гладка О.М., Кузьменко А.П. Обчислювальні технології на основі методів комплексного аналізу та сумарних зображень. – Рівне: «Асоль», 2016. – 283 с.

[4] Бомба А.Я., Бойчура М. В. Методи комплексного аналізу в задачах ідентифікації. – Рівне: НУВГП, 2020. – 201 с.

[5] Бомба А. Я., Каштан С. С., Кушнір О. О. Методи комплексного аналізу моделювання глобальних процесів руху поверхневих та підземних вод. - XI Міжнародна наукова конференція «Математичні проблеми механіки неоднорідних структур» (м.Львів, 24-26 вересня 2024р.). Львів: ІППММ, 2024. -2с.

[6] Бомба А. Я., Кушнір О. О. Модифікація задачі Д. Гільберта при моделюванні процесів повільного руху рідин з перетоками. - Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, (7), 282–283.

[7] Bomba A.Ya., Kashtan S. S., Skopetskii V.V. Nonlinear Inverse Boundary - Value Problems of Conformal Mapping with a Controlling Potential Cybernetics and Systems Analysis.- 2004.- Vol. 40, №1.- P.58-65.

[8] Бомба А. Я., Бойчура М. В., Савюк Є. В. Числові методи квазіконформних відображень моделювання повільного руху рідини у водоймах. - Вісник НУВГП. – №2(74) – 2016. – С.92-106.

[9] Бомба А. Я., Каштан С. С. Методи комплексного аналізу прогнозування керованих рухів поверхневих та фільтраційних вод. - Кібернетика та сисмний аналіз. №5 - 2025. - С.39-54.

Елементи кібермематичного моделювання в напівпровідниковій електроніці

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.088

Андрій Бомба
Кафедра комп`ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
a.ya.bomba@nuwm.edu.ua

Захар Лістьєв
Кафедра комп`ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
z.c.listiev@nuwm.edu.ua

Ігор Мороз
Кафедра комп`ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
i.p.moroz@nuwm.edu.ua

Анотація — **Проведено огляд основних підходів до математичного моделювання процесів у пристроях напівпровідникової електроніки з урахуванням багатомасштабності та граничних шарів. Окреслено перспективи розвитку мультифізичних моделей із використанням методів теорії збурень, алгоритмів машинного навчання для потреб сучасної напівпровідникової промисловості.**

Ключові слова — кібермематичне моделювання, штучні нейронні мережі, задачі математичної фізики, метод збурень, сингулярно збурена задача, інтегральна p-i-n-структура.

I. Вступ

Сучасний етап розвитку прикладної математики та інформаційних технологій характезується інтеграцію класичних методів моделювання з інструментами штучного інтелекту. Зростання рівня складності процесів у напівпровідниковій електроніці, зумовлене мультифізичними нелінійними взаємодіями потребує моделей, що поєднують високу точність та обчислювальну ефективність.

Одним із перспективних підходів до вирішення цієї проблеми є кібермематичне моделювання – поєднання строгого математичного апарату, зокрема асимптотичних методів [1, 2] з алгоритмами машинного навчання [3]. На відміну від традиційних методів, таке поєднання забезпечує адаптивність моделей, інтеграцію експериментальних даних і збереження фізичної узгодженості. Особливу роль відіграють нейронні мережі, зокрема Physics-Informed Neural Networks [4], які об'єднують фундаментальні моделі з експериментальними даними навіть у випадку, коли дані неповні або зашумлені.

Мета роботи – огляд сучасних засобів кібермематичного моделювання для вирішення задач напівпровідникової електроніки (зокрема p-i-n-структур).

II. Проблематика предметної області

Застосування кібермематичного підходу у моделюванні характеристик напівпровідникових пристроїв проілюструємо на прикладі плазмових діодів (p-i-n-структур) [5]. Особливість таких пристроїв полягає у тому, що електрофізичні властивості його активної області (i-області), яка знаходиться між шарами напівпровідникових матеріалів з електронною (n) та дірковою (p) провідністю, змінюється у залежності від керуючого струму, що протікає через p-i-n-структуру. При протікання зарядів через зони n-i- та p-i-контактів (інжекції) в активній області внаслідок дифузійно-дрейфових, рекомбінаційних, теплових процесів формується електронно-діркова плазма, яка і визначає властивості пристрою [5].

В основу математичної моделі характеристик p-i-n-структур покладено стаціонарні/нестаціонарні рівняння неперервності струмів електронів і дірок, Пуассона, теплопровідності з відповідними граничними умовами. Для прикладу [6], у найпростішому випадку (одновимірний, стаціонарний, виконуються умови теплової рівноваги) математична модель подається наступною системою ЗДР:

$$\begin{cases} \mu^2 \dfrac{dE}{dx} = \left(p - n + N_d \right), \\ \dfrac{d^2 n}{dx^2} + \dfrac{dn}{dx} E + n \dfrac{dE}{dx} - A_n n = 0, \\ \dfrac{d^2 p}{dx^2} - \dfrac{dp}{dx} E - p \dfrac{dE}{dx} - A_p p = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\left. \frac{dn}{dx} - \gamma_n w n \right|_{x=0} = \frac{Jw}{eD_n N_i}, \quad \left. -\frac{dp}{dx} - \gamma_p w p \right|_{x=0} = 0, \quad (2)$$

$$\left. \frac{dn}{dx} - \gamma_n w n \right|_{x=1} = 0, \quad \left. -\frac{dp}{dx} - \gamma_p w p \right|_{x=1} = \frac{J}{eD_p} \frac{w}{N_i},$$

$$E\big|_{x=0} = 0, \quad E\big|_{x=1} = 0, \quad \int_0^1 E dx = U, \quad (3)$$

де $E(x)$, $n(x)$, $p(x)$ – шукані функції напруженості електричного поля, розподілів концентрацій електронів і дірок в і-області p-i-n-діода відповідно (використовується нормування $\tilde{x} = \dfrac{x}{w}$, $\tilde{E} = \dfrac{Eew}{kT}$, $\tilde{n} = \dfrac{n}{N_i}$, $\tilde{p} = \dfrac{p}{N_i}$; знак "~" надалі опущено); $\mu^2 = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 kT}{e^2 w^2 N_i}$ (малий параметр); ε – відносна діелектрична стала; ε_0 – діелектрична стала; w – характерний розмір активної області діода; e – заряд електрона; N_i - концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику; k – стала Больцмана; T - температура; $A_n = \dfrac{w^2}{D_n \tau_n^*}$, $A_p = \dfrac{w^2}{D_p \tau_p^*}$, D_n, D_p – коефіцієнти дифузії дірок та електронів відповідно; τ_n^*, τ_p^* - характерні часи рекомбінації носіїв заряду в об'ємі активної області (у даній математичній моделі є сталими, які залежать, як і коефіцієнти дифузії, від обраного матеріалу напівпровідника); N_d – профіль легування; J – густина струму інжекції; U – різниця потенціалів, прикладена до структури; γ_n, γ_p - коефіцієнти рекомбінації носіїв заряду на контактах.

Задачі моделювання відзначаються мультифізичністю, різними часовими масштабами процесів (наведений приклад постановки задачі (1)-(3) цього не ілюструє), нелінійністю, що ускладнює їх розв'язання. Використання лише класичних чисельних методів часто вимагає значних ресурсів, тоді як асимптотичні та рекурентні підходи дозволяють зменшити обчислювальні витрати і водночас зберегти адекватність фізичної інтерпретації.

Розрізняють прямі та обернені задачі [7, 8]. Прямі задачі спрямовані на визначення характеристик стану структури за заданими параметрами системи (наприклад, функцій $E(x)$, $n(x)$, $p(x)$, $T(x)$), тоді як обернені полягають у відновленні властивостей матеріалів (наприклад, значень D_n, D_p), геометрії елементів тощо на основі експериментальних даних. Приклад структурування задач наведено на рис. 1. Обернені задачі є особливо складними, оскільки часто мають некоректний характер і потребують застосування методів регуляризації та оптимізації.

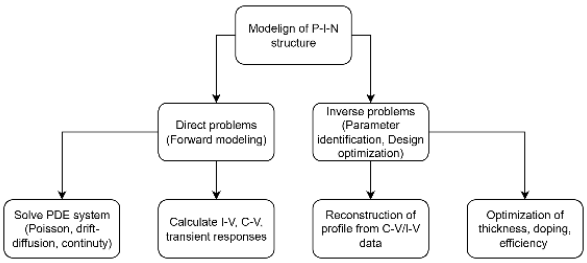


Рис. 1. Система прямих та обернених задач моделювання характеристик p-i-n-структур

Поєднання класичних математичних моделей із сучасними інтелектуальними алгоритмами відкриває можливість ефективного розв'язання задач цього типу, підвищуючи рівень точності та знижуючи ресурсоємність розрахунків.

Відмітимо, що задачі напівпровідникової електроніки містять природним чином сформований малий параметр при старших похідних (див. приклад задачі (1)-(3)), що призводить до утворення граничних шарів і складної багатомасштабної (!) поведінки розв'язків [2, 6]. Пряме чисельне розв'язання цих задач потребує побудови надзвичайно дрібних обчислювальних сіток поблизу граничних шарів, що потребує значних обчислювальних ресурсів і ускладнює забезпечення стійкості алгоритмів. Підвищення ефективності алгоритмів розв'язання задач напівпровідникової електроніки вбачаємо у застосуванні асимптотичних методів, зокрема методу примежових поправок [1, 2], які, у свою чергу, спонукають до використання алгоритмів символьних перетворень для отримання результатів розчеплення початкових складних задач та спеціалізованих нейронних мереж для автоматизованого розпізнавання типу задач, що отримані у результаті розчеплення.

III. Проблематика кібератематичного моделювання

Вирішення проблем напівпровідникової електроніки (складність яких постійно зростає) зумовлює потребу у створенні гібридних моделей, які поєднують строгі аналітичні методи з інтелектуальними обчислювальними технологіями, такими як нейронні мережі та Physics-Informed Neural Networks (PINN) [4]. Такий підхід відкриває можливості для автоматизації процесу побудови моделей, адаптивної дискретизації розрахункових сіток та формування високоточних прогнозів поведінки пристрою в широкому діапазоні режимів роботи [9].

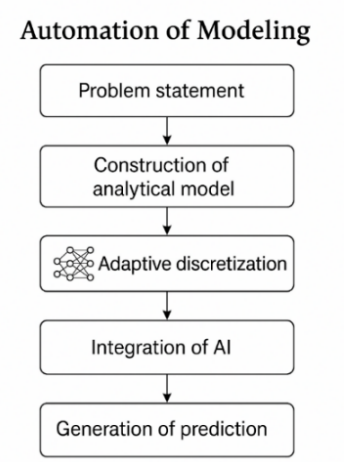


Рис 2. Блок-схема автоматизації моделювання

Методи теорії збурень є одним із найефективніших підходів для розв'язання таких задач. Для p-i-n-структур цей підхід передбачає виділення внутрішнього розв'язку, який описує поведінку в основній області, та зовнішнього (граничного) розв'язку, що відтворює різкі зміни поблизу контактів. Рекурентні алгоритми дають змогу автоматизувати процес побудови таких розв'язків, покроково уточнюючи як внутрішню, так і примежову частини моделі. Це дозволяє уникнути надмірної глобальної дискретизації та зберегти високу точність при суттєвому зменшенні обчислювальних витрат [7, 9]. Загальну блок-схему процесу автоматизації моделювання показано на рис. 2.

Проблема автоматизації процесів моделювання у напівпровідниковій електроніці полягає у зменшенні залежності результату від ручного налаштування параметрів чисельних методів, геометрії та фізичних характеристик приладів. Класичні чисельні схеми, такі як метод скінченних різниць, метод скінченних елементів зазвичай вимагають ретельного підбору сітки та параметрів, особливо у випадках із сильними локальними збуреннями [7, 9, 10]. Це ускладнює моделювання багатоваріантних сценаріїв, оптимізацію структури приладів та проведення обернених розрахунків для відновлення профілю легування або геометрії на основі експериментальних даних.

Один із способів розв'язання цієї проблеми є використання гібридних кібернетичних моделей, у яких аналітична частина забезпечує концептуальну структуру, а інтелектуальний блок – наприклад, нейронна мережа – виконує роль адаптивного апроксиматора складних залежностей [11, 12]. Поєднання асимптотичних методів і Physics-Informed Neural Networks дозволяє скоротити кількість необхідних обчислень, автоматично визначати поправки для граничних шарів і забезпечувати стійкість моделювання навіть за наявності шумових даних або неповної інформації про систему. Такі підходи вже продемонстрували ефективність у задачах моделювання електронних і оптоелектронних пристроїв, а також у процесах оптимізації параметрів мікро- і наноелектронних компонентів [11, 12]. Концептуальну схему кібер-математичного моделювання наведено на рис. 3.

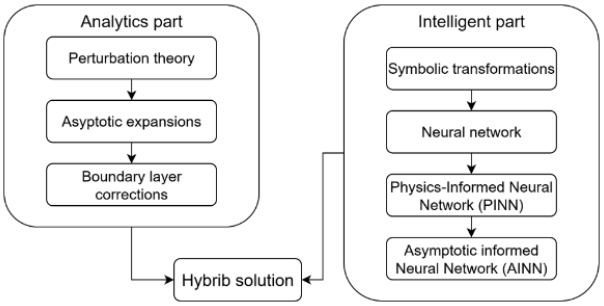


Рис 3. Концептуальна схема кібернетичного моделювання задач напівпровідникової електроніки

Сучасний стан досліджень у галузі математичного моделювання напівпровідникових структур характеризується значними досягненнями у застосуванні як аналітичних, так і чисельних методів, однак низка суттєвих обмежень залишається невирішеною. Більшість існуючих робіт зосереджена на задачах зі згладженими розв'язками та відносно простою геометрією області, де поведінка фізичних величин змінюється поступово і не виникає різко виражених граничних шарів або багатомасштабних переходів [7, 9, 10]. Такий підхід часто не відповідає реальним умовам роботи сучасних напівпровідникових пристроїв, особливо високочастотних або силових, у яких складна структура профілю легування, неоднорідності матеріалів та впливи зовнішніх полів призводять до появи областей з різко змінними характеристиками.

Ще однією характерною особливістю проблемної області є поєднання кількох фізичних процесів у межах однієї моделі – електричних, теплових, оптичних та, у деяких випадках, механічних взаємодій. Це призводить до формування мультифізичних математичних моделей, які містять системи диференціальних рівнянь в частинних похідних з сильно нелінійними зв'язками та різними часовими і просторовими масштабами [1, 2, 13, 14]. Традиційні чисельні методи, навіть високого порядку точності, часто виявляються неефективними в таких умовах через необхідність одночасного врахування жорстких граничних умов, високої розмірності задачі та відсутності повної інформації про параметри.

Додатковою проблемою є відсутність уніфікованих підходів до моделювання структур з неповними або зашумленими експериментальними даними. У багатьох випадках інформація про профіль легування, дефекти або граничні умови є неповною чи неточною, що ускладнює застосування класичних методів моделювання [15]. Застосування штучного інтелекту, зокрема Physics-Informed Neural Networks та їхніх модифікацій, дає змогу частково компенсувати цю проблему, проте інтеграція таких підходів у повноцінний інженерний цикл залишається відкритим завданням.

IV. Нейромережеві підходи в кібернетичному моделюванні

Сучасний розвиток кібернетичного моделювання тісно пов'язаний із впровадженням символьних перетворень та нейромережевих методів для розв'язання диференціальних рівнянь, що описують процеси електронно-діркового переносу, теплопровідності, дифузії та взаємодії багатофізичних явищ у напівпровідникових структурах. Штучні нейронні мережі виступають функціональними апроксиматорами розв'язків, де навчання здійснюється з урахуванням як експериментальних даних, так і виконання рівнянь з початковими та граничними умовами.

Важливим здобутком у цьому напрямі стали Physics-Informed Neural Networks (PINN) [4, 16], які завдяки автоматичному диференціюванню інтегрують рівняння у процес навчання, що дозволяє працювати навіть за умов неповних або зашумлених даних. Подальший розвиток привів до Asymptotically-Informed Neural Networks (AINN) [17, 18], у яких архітектура враховує апріорні знання про асимптотичну поведінку розв'язків у граничних шарах, що особливо важливо для задач із вираженою багатомасштабністю, зокрема для p-i-n-структур.

Розвиваються також архітектури, що враховують закони збереження та симетрії систем, як-от Hamiltonian Neural Networks чи Symmetry-Preserving Networks, що підвищує точність і зменшує потребу в обсязі навчальних даних. Окрему увагу приділено оберненим задачам, де нейронні мережі застосовуються для відновлення параметрів або аналітичних виразів рівнянь на основі експериментальних спостережень чи числових розв'язків, зокрема із залученням трансформерних архітектур.

Поєднання класичних методів теорії збурень з глибинними нейронними мережами формує новий клас гібридних моделей, здатних автоматизувати розв'язання складних багатомасштабних задач та підвищити ефективність аналізу даних у прямій та оберненій постановках. У результаті визначальними факторами розвитку моделювання p-i-n-структур є багатомасштабність і жорсткість задач, мультифізичність процесів та неповнота даних, що зумовлює потребу у створенні гібридних методів, які поєднують аналітичну строгість з адаптивністю машинного навчання.

V. Висновки

Огляд підходів до моделювання процесів у напівпровідниковій електроніці показав, що традиційні чисельні методи часто виявляються недостатньо ефективними для задач із багатомасштабністю, складною геометрією та неповними даними. Перспективним є використання методів теорії збурень у поєднанні з рекурентними алгоритмами та інструментами кібернетичного моделювання, зокрема нейронними мережами. Такий підхід дозволяє зменшити обчислювальні витрати, зберігаючи точність і фізичну узгодженість результатів.

Інтеграція штучного інтелекту, зокрема Physics-Informed Neural Networks, відкриває нові можливості для розв'язання задач оптимізації та ідентифікації параметрів. Подальші дослідження пов'язані з розвитком мультифізичних моделей, здатних враховувати комплексні впливи та автоматично прогнозувати характеристики пристроїв, що відповідає потребам сучасної напівпровідникової промисловості.

Література

[1] Vasil'eva A.B. The Boundary Function Method for Singular Perturbation Problems / A.B. Vasil'eva, V.F. Butusov, L.V. Kalachev. – Philadelphia: SIAM, 1995. – 357 p.

[2] Bomba A. Development and Analysis of the Plasma Characteristics Mathematical Model in the Active Region of Integrated P-I-N-Structures by the Perturbation Theory and Conformal Maps Methods / A. Bomba, I. Moroz, M. Bojchura // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – № 5(113). – P. 51–61.

[3] Russell S. Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.) / S. Russell, P. Norvig. – Hoboken, NJ: Pearson, 2020. – 1136 p.

[4] Karniadakis G.E. Physics-informed machine learning / G.E. Karniadakis, I.G.Kevrekidis, L.Lu, P.Perdikaris, S.Wang, L.Yang, // Nature Reviews Physics. – 2021. – 3(6). – P. 422–440.

[5] Sze S. Physics of Semiconductor Devices / S. Sze, Y. Li. – Hoboken: Wiley, 2021. – 944 p.

[6] Бомба А. Я. Використання сучасних інформаційних технологій в системах автоматизованого розв'язання сингулярно збурених задач / А. Я. Бомба, І. П. Мороз, З. С. Лістьєв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2024. – № 2(7). – С. 24–35.

[7] Selberherr S. Analysis and Simulation of Semiconductor Devices / S. Selberherr. – New York: Springer, 1984. – 296 p.

[8] Ободан Н. І. Обернені задачі ідентифікації моделей: навч. посіб. / Н. І. Ободан, Н. А. Гук. – Дніпро: РВВ ДНУ, 2013. – 48 с.

[9] Jerome J. W. Analysis of Charge Transport: A Mathematical Study of Semiconductor Devices / J. W. Jerome. – Berlin: Springer, 1996. – 167 p.

[10] Markowich P. A. Semiconductor Equations / P. A. Markowich, C. Ringhofer, C. Schmeiser. – Wien: Springer, 1990. – 248 p.

[11] Raissi M. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear PDEs / M. Raissi, P. Perdikaris, G. E. Karniadakis // Journal of Computational Physics. – 2019. – v.378. – P. 686–707.

[12] Cuomo S. Scientific Machine Learning Through Physics-Informed Neural Networks: Where we are and What's next / S. Cuomo, V. S. Di Cola, F. Giampaolo, G. Rozza, M. Raissi, F. Piccialli // Journal of Scientific Computing. – 2022. – v.92. – № 3. – Article 88. – 62 p.

[13] Smith D. R. Singular-Perturbation Theory: An Introduction with Applications / D. R. Smith. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1985. – 520 p.

[14] Belyanin M. P. On the Asymptotic Solution of One P-N-Junction Model / M. P. Belyanin // U.S.S.R. Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 1986. – v.26. – № 2. – P. 306–311.

[15] Bondeson A. Computational Electromagnetics / A. Bondeson, T. Rylander, P. Ingelström. – New York: Springer, 2005. – 224 p.

[16] He Y.-H. AI-driven research in pure mathematics and theoretical physics / Y.-H. He // Nature Reviews Physics. – 2024. – v.6. – № 9. – P. 546–553.

[17] Meng, X. Asymptotically-informed physics-informed neural networks for multiscale and singular perturbation problems / X. Meng, G.E. Karniadakis // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2023. – 415(Part B). – 116188.

[18] Wang Z. Asymptotically-Informed Neural Networks for Multiscale Singular Perturbation Problems / Z. Wang, M. Zhou, Y. Liu, Z. Xie // arXiv preprint. – 2021. – arXiv:2105.06734.

Використання закону розподілу трендових залишків врожайності для моделювання ризиків виробництва зерна

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.089

Максим Гаврилюк
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
m.s.havryliuk@nuwm.edu.ua

Петро Грицюк
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
p.m.hrytsiuk@nuwm.edu.ua

Зерновиробництво є основою аграрної галузі України, відіграючи ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки, формуванні експортного потенціалу та розвитку сільськогосподарських угідь. Завдяки сприятливим природно-кліматичним умовам і наявності родючих ґрунтів, Україна традиційно залишається одним із провідних виробників і експортерів зерна у світі. Однак, ця галузь економіки залишається високоризикованою через значні коливання врожайності культур та закупівельних цін. У даному дослідженні поставлено завдання дослідити різні підходи до оцінювання ризику зерновиробництва, пов'язаного з міжрічними коливаннями врожайності. В якості досліджуваної культури обрано пшеницю. Враховуючи помітне зростання врожайності пшениці за останні роки, для статистичного аналізу були використані не значення врожайності, а відхилення врожайності від лінійного тренду. Розвинуті два підходи до оцінювання ризику: порівняльний, який дозволяє порівнювати ступінь ризику зерновиробництва у двох регіонах, та квантильний, який дозволяє оцінити імовірність фіксованих втрат зерна у даному регіоні. Дані підходи можуть бути використані як аналітичний інструмент при плануванні агропромислового виробництва, особливо в умовах зростаючих кліматичних ризиків. Результати дослідження мають практичне значення для аграрних менеджерів, економістів та державних органів, зацікавлених у підвищенні стабільності та прогнозованості виробництва зернових культур. Запропоновані підходи до кількісного оцінювання ризику дозволяють не лише визначати ступінь можливих втрат, але й формувати ефективні стратегії зниження негативного впливу несприятливих факторів.

Ключові слова – зерновиробництво; врожайність пшениці; аграрний ризик; квантильний підхід; оцінювання ризиків.

I. Вступ

Виробництво зерна є однією з найважливіших галузей економіки України, що забезпечує продовольчі потреби населення та стабільний приплив валюти. В той же час, зерновиробництво є високоризиковим бізнесом з огляду на те, що на врожайність дуже сильно впливають зміни погодно-кліматичних умов. Сучасний підхід до оцінювання економічних ризиків опирається на статистичний аналіз дохідності активу. В ролі дохідності зерновиробництва зазвичай вибирають рентабельність зерновиробництва, значення якої надають статистичні джерела [1].

II. Виклад основного матеріалу

A. Статистичні методи оцінювання ризику

Класичним методом оцінювання ризику в економіці є використання стандартного відхилення дохідності активу. Для використання такого підходу необхідно виконання двох умов: стаціонарність дохідності та відповідність даних до нормального закону розподілу. У нашому дослідженні аналогом дохідності виступає врожайність. При цьому перша з вказаних вище умов не виконується, оскільки врожайність пшениці зростає в усіх регіонах України. Тому ми використовуємо модифікований варіант стандартного відхилення для нестаціонарних даних.

Інший підхід, який є ефективним для порівняльного аналізу ступеня ризику вирощування пшениці в областях України – це ранжування областей за ступенем спадання ризику. При цьому ранг 1 відповідає регіону з найвищим ступенем ризику. Аналіз таблиці показує, що практично немає різниці між методами оцінки ризику R3 та R4. Різниця між методами R1 та R2 також є невеликою. Звідси слідує висновок, що метод семіваріації не вносить суттєвого покращення в оцінку ризику зерновиробництва. Різниця між підходами R1 та R3 також не дуже велика. Таким чином, остаточний висновок полягає у тому, що варіація трендових відхилень врожайності R1 є достатньо надійним методом оцінювання ризику зерновиробництва. Метод ранжування дає найвищі оцінки ризику зерновиробництва для Харківської, Дніпропетровської, Кіровоградської та Одеської областей. Найменші ризики зерновиробництва є

характерними для Рівненської, Волинської, Львівської та Закарпатської областей.

B. Ідентифікація закону розподілу врожайності

Аналіз кореляційної матриці, побудованої на основі часових рядів детрендованої врожайності, дозволив нам виділити три агрокліматичні зони на території України: степова зона (Одеська, Херсонська, Миколаївська, Дніпропетровська, Запорізька та Кіровоградська області); лісостепова зона (Сумська, Харківська, Полтавська, Київська, Черкаська та Вінницька області); західна зона (Волинська, Рівненська, Житомирська, Львівська, Тернопільська та Хмельницька області). Для групування областей ми використовували кореляційний аналіз часових рядів детрендованої врожайності. Такий підхід пояснюється тим, що значення трендових залишків врожайності найбільш адекватно відображає вплив погодно-кліматичних умов на врожайність пшениці. Якісно відмінний характер динаміки врожайності в інших областях України, які не включені до даного переліку, не дозволив віднести їх до жодної з вищеназваних зон [2].

Наші дослідження показали, що трендові залишки врожайності добре підкоряються нормальному закону розподілу у західному регіоні України і, дещо гірше, у лісостеповому регіоні. Розподіл залишків врожайності для степового регіону має характерні «важкі хвости» і найкраще описується розподілом Лапласа [3]. Використання асиметричного розподілу Лапласа дає лише невеликі поправки до симетричного розподілу трендових залишків врожайності (коефіцієнт асиметрії k=0,994). Це свідчить про незначну асиметрію розподілу.

C. Квантильні методи оцінювання ризиків

У даному дослідженні ми використовуємо методику оцінювання ризиків, прийняту для оцінювання фінансових ризиків. Довгий час традиційним методом вимірювання фінансових ризиків було стандартне відхилення дохідності. Цей підхід ґрунтується на припущенні про нормальний розподіл доходів. Коли з'ясувалося, що нормальний розподіл не характерний для дохідності фінансових інструментів, стали використовуватися інші методи оцінки ризику. Найбільш поширеними серед них є кількісні оцінки ризику, які спираються на гіпотези про тип розподілу дохідності фінансового інструмента.

У сучасній теорії ризиків найкращими вважаються міри, які обчислюють ризик на основі відповідних квантилів функції втрат. Сьогодні найпоширенішою квантильною мірою є *Value-at-Risk (VaR)* [4]. VaR_α − це мінімальний рівень втрат з імовірністю *(1-α)*, або ж максимальний рівень втрат з імовірністю *α*. VaR_α − це оцінка втрат, яку очікувані збитки не перевищать протягом даного періоду часу з заданою ймовірністю *α*. Для обчислення точного значення квантилі необхідно знати функцію розподілу дохідності досліджуваного активу $F_x(x)$. При відомому рівні довіри *α* для VaR_α ризик фінансового активу з дохідністю x_t дорівнює

$$VaR_\alpha(x_t) = sup\{x \in \Re : F_x \leq \alpha\} \quad (1)$$

VaR_α характеризується трьома параметрами: рівнем довіри (зазначена ймовірність), часовим горизонтом і одиницями вимірювання. Для статистики врожайності ми використовували рівень довіри 90% (α=0,10). Такий вибір пояснюється значними коливаннями врожайності пшениці у різні роки спостережень. Наприклад, для Дніпропетровської області середньоквадратичне відхилення залишків врожайності становить 8,29 ц/га, для Харківської області цей показник становить 8,18 ц/га. Період часу у наших оцінках становить 1 рік, одиницею вимірювання є одиниця вимірювання врожайності − 1 ц/га.

Недоліком методу VaR є те, що він дає оцінку ризику тільки для зазначеного рівня достовірності. Крім того, міра ризику VaR не є адитивною. Цей недолік відсутній в методі умовного значення під ризиком (CVaR), який заснований на методі VaR. Умовна вартість під ризиком − це зважений за ймовірністю очікуваний збиток у хвості розподілу за межами порогу VaR. Формальне визначення CVaR можна записати наступним чином:

$$CVaR_\alpha(X) = E(F(X)|\, X > VaR_\alpha) \quad (2)$$

Використовуючи форму функції розподілу Лапласа, аналітичний вираз для VaR_α можна знайти при заданому довірчому рівні VaR_α

$$VaR_\alpha = \mu + \frac{1}{\nu} ln(2\alpha) \quad (3)$$

Використовуючи отримані вирази та програмне середовище Python за підтримки бібліотеки Sciру, ми розрахували оцінки ризику VaR та CVaR на довірчому рівні 90% для кожної агрокліматичної зони (Table 1). Для розрахунку CVaR ми виконували чисельне інтегрування функції розподілу F(x) згідно із співвідношенням

$$CVaR_\alpha = \frac{\int_{-\infty}^{VaR_\alpha} x \cdot F(x)dx}{\int_{-\infty}^{VaR_\alpha} F(x)dx} \quad (4)$$

TABLE I. МІРИ РИЗИКУ VAR І CVAR ДЛЯ РІЗНИХ АГРОКЛІМАТИЧНИХ ЗОН (РІВЕНЬ НАДІЙНОСТІ 90%)

	Степ	***Лісостеп***	***Захід***
Розподіл залишків	Лапласа	нормальний	нормальний
VaR, (ц/га)	-9.43	-8.40	-5.67
CVaR, (ц/га)	-15.84	-11.51	-7.76

Наведене у Table 1 значення CVaR дає оцінку можливих втрат врожайності (ц/га) у порівнянні з очікуваним трендовим значенням, які можуть настати з імовірністю 10% і менше. Як показує аналіз таблиці 3, міра ризику CvaR дає оцінку ризику на 37% вищу, ніж міра ризику VaR у випадку нормального розподілу; міра ризику CvaR дає оцінку ризику на 68% вищу, ніж міра ризику VaR у випадку розподілу Лапласа. З таблиці видно, що степова зона є найбільш ризикованим регіоном з точки зору вирощування пшениці. Захід є найменш ризикованим регіоном завдяки малій імовірності літньої спеки та посухи. Однак, зміни клімату, які тривають, можуть змінити отримані нами оцінки.

III. Висновки

Таким чином, використовуючи сучасні інструменти оцінювання ризиків ми отримали можливість оцінювати імовірність настання низьких врожаїв. Отримані результати представляють інтерес для аграріїв та інвесторів, оскільки дозволяють планувати посіви зернових з урахуванням імовірних ризиків.

Література

[1] Державна служба статистики України [Електронний ресурс], Режим доступу: https://www.ukrstat.gov.ua/.

[2] Грицюк П.М., Гаврилюк М.С., Джоші О.І. Ідентифікація закону розподілу трендових залишків врожайності як інструмент моделювання ризиків зерновиробництва. Штучний інтелект (2025) 30(2): 72-83. DOI: https://doi.org/10.15407/jai2025.02.072.

[3] Petro Hrytsiuk, Tetiana Babych (2020). The cryptocurrencies risk measure based on the Laplace distribution. Machine Learning for Prediction of Emergent Economy Dynamics 2020. International Conference on Monitoring, Modeling & Management of Emergent Economy, Odesa, Ukraine, January 2022, pp. 261-276.

[4] Dowd, Kevin, «Measuring Market Risk. John Wiley & Sons», 2005

Визначення за дискретними даними функції концентрації домішкових частинок у граничній умові задачі масоперенесення

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.090

Богдан Гера
Відділ числових методів математичної фізики
Інститут прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАНУ
Львів, Україна
gera-zen@ukr.net

Анастасія Чучвара
Відділ числових методів математичної фізики
Інститут прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАНУ
Львів, Україна
davydoka@gmail.com

Ольга Чернуха
Відділ числових методів математичної фізики
Інститут прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАНУ
Кафедра обчислювальної математики і програмування
Національний університет "Львівська політехніка",
Львів, Україна
zaliznuchna6@gmail.com

Юрій Білущак
Відділ числових методів математичної фізики
Інститут прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАНУ
Кафедра обчислювальної математики і програмування
Національний університет "Львівська політехніка",
Львів, Україна
byixx13@gmail.com

Анотація—**Виходячи з сукупності числових значень концентрації домішкової речовини на одній з границь пористого шару, що виникає в процесі перенесення домішок у пористому середовищі, проведено відновлення, з використанням параметричного сімейства функцій, граничної умови для задачі масоперенесення в шарі при наявності сорбції. Невідомі їх параметри знаходимо методами математичного програмування. Розроблено програмний модуль, що дає можливість поводити обчислювальні експерименти. Проведено числові розрахунки відновленої функції для різних сукупностей числових даних та із запропонованими варіантами параметричних функцій, що дає можливість використовувати найбільш прийнятні з них у кожному з випадків вхідних даних.**

Ключові слова—визначення граничної умови, масоперенесення, параметричне сімейство функцій, нелінійна оптимізація.

I. Вступ

Визначення функції концентрації домішкових частинок, що переносяться у пористому тілі, з рівняння дифузії-адвекції-сорбції за неповних граничних чи початкових умов або параметрів рівнянь та при додатково відомих дискретних значеннях шуканої функції в області тіла чи на його границі належить до погано обумовлених задач. Проте з цим доводиться мати справу при розв'язанні прикладних задач. Наприклад, такі задачі характерні для гідрогеології (відновлення потоків і концентрацій забрудників), теплофізики (визначення теплового потоку без прямого вимірювання), хімічної технології (ідентифікація параметрів сорбції чи швидкості реакцій) та біомедицини (оцінка перенесення речовин у тканинах за непрямими даними) [1, 4, 7]. У всіх цих випадках прямий експеримент не дозволяє безпосередньо задати граничну умову на деякій поверхні, водночас відомі лише дискретні вимірювання поля (концентрації, температури, тиску тощо) у внутрішніх точках або на границях. Це приводить до задач з неповними або неточними даними, які вимагають спеціальних методів регуляризації для забезпечення існування та єдиності розв'язку.

При цьому особливий інтерес становлять моделі масоперенесення у пористих середовищах, де одночасно відбуваються дифузія, адвекція та сорбція. Такі процеси характерні для руху домішок у грунтових водах, фільтраційних шарах, пористих будівельних матеріалах, а також у багатьох технологічних установках.

У даній роботі досліджено відновлення невідомої граничної умови для концентрації домішкових частинок на одній з поверхонь пористого шару за відомих ній сукупності дискретних значень концентрації.

II. Постановка задачі

Розглянуто шар пористої речовини, що займає область $0 \le x \le x_0$. На поверхні $x = 0$, починаючи з деякого моменту часу, діє постійне джерело маси домішкових частинок, що проникають всередину шару, де відбувається їх дифузія, адвекція з постій-

ною швидкістю та сорбція пов'язана з пористістю речовини. У такому випадку рівняння для функції концентрації домішкових частинок $c(x,t)$ в середині шару можемо записати у вигляді [3]

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = d\frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} - v\frac{\partial c(x,t)}{\partial x} - \kappa c(x,t),$$

де x – просторова координата ($0 < x < x_0$), t – час ($t > 0$), d – коефіцієнт дифузії домішки, v – швидкість адвективного перенесення, κ – коефіцієнт інтенсивної сорбції.

Прийнято, що в початковий момент часу відсутня домішкова речовина в тілі, тобто

$$c(x,0) = 0,$$

а на верхній границі тіла діє стале джерело маси, домішкової речовини

$$c(0,t) = c_0.$$

Для коректної постановки задачі необхідна ще умова на границі $x = x_0$, де концентрація змінюється природнім чином, без спеціального зовнішнього впливу на процеси всередині шару. Нехай відомо (або можна виміряти) значення функції концентрації $c(t,x)$ на нижній границі $x = x_0$ в певні моменти часу (Таблиця 1).

ТАБЛИЦЯ I. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЗНАЧЕННЯ ШУКАНОЇ ФУНКЦІЇ НА ГРАНИЦІ $x = x_0$

t	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	…	t_n
$F(t)$	0	0	0	$F(t_4)$	$F(t_5)$	…	$F(t_n)$

Тобто, маємо умову $F(t) = c(t, x_0)$.

Таким чином отримано задачу з неповними даними, а отже потрібно визначитися з критерієм та зробити припущення для обґрунтування вибору з множини допустимих функцій, що задовольняють відомі умови, найбільш прийнятної для нашого випадку.

Маємо типову задачу з неповними даними. Потрібно визначитися з критерієм вибору з множини допустимих неперервних функцій, що задовольняють відомі умови, найбільш прийнятної для функції концентрації домішок на границі.

III. Визначення граничної умови на нижній поверхні шару

Для зручності виконано перехід до безрозмірних змінних, що стискають часову та розтягують просторову осі [4]: $\tau = \kappa t$, $\xi = (\kappa/d)^{1/2} x$, $C(\xi,\tau) = c(x,t)/c_*$, де c_* задана величина з розмірністю концентрації, а також прийнято $\kappa > 0$. Такий підхід не залежить від геометрії тіла чи характерних масштабів його мікронеоднорідностей.

Для відновлення зміни у часі функції концентрації на поверхні $\xi = \xi_0$ використано параметричне сімейство функцій $\Psi(\tau,\alpha_i) \equiv \Psi(\tau,\alpha_1,\alpha_2,\ldots,\alpha_m)$, де α_i ($i = \overline{1;m}$) – невідомі параметри, котрі потрібно встановити, щоб оптимально наблизитися до дискретних даних і не було суперечностей з іншими характеристиками задачі.

У багатьох застосуваннях шукану граничну функцію подають у вигляді лінійної комбінації відомих функцій

$$\Psi(\tau,\alpha_1,\alpha_2,\ldots,\alpha_m) = \alpha_1\psi_1(\tau) + \alpha_2\psi_2(\tau) + \cdots + \alpha_m\psi_m(\tau),$$

де α_i – шукані коефіцієнти, а $\psi_i(\tau)$ – відомі функції.

Тоді визначальним може виявитися вибір цих базових функцій. Часто їх приймають у вигляді поліномів. Однак для моделі дифузії-адвекції-сорбції це не завжди коректно, оскільки їх лінійна комбінація не має стосунку до функцій концентрації домішкових частинок.

Оскільки на одній з поверхонь шару концентрація встановлюється постійною і звідти частинки поширюються в шарі, то потрібно орієнтуватися на відновлення функції, що спадає при віддаленні від цієї поверхні, але монотонно зростає з часом.

Тому розглянуто більш загальний випадок, коли функції $\Psi(\tau,\alpha_i)$ від α_i є нелінійними і мають потрібні властивості.

Як приклад наведемо наступні функції, що більш прийнятні для наближення концентрації, оскільки аналітичні розв'язки модельних задач дифузії-адвекції-сорбції мають подібні складові

$$\Psi_1(\tau,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3) = \alpha_1 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha_2}{\sqrt{\tau}} - \alpha_3\sqrt{\tau}\right),$$

$$\Psi_2(\tau,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3) = \alpha_1 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha_2}{\sqrt{\tau}} + \alpha_3\sqrt{\tau}\right),$$

$$\Psi_3(\tau,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4) = \alpha_1 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha_3}{\sqrt{\tau}} - \alpha_4\sqrt{\tau}\right) +$$

$$+ \alpha_2 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha_3}{\sqrt{\tau}} + \alpha_4\sqrt{\tau}\right),$$

а також з метою порівняльного аналізу розглянуто параметричні функції, що містять поліноміальну, тригонометричну та обернену тригонометричну функції наступного вигляду

$$\Psi_4(\tau,\alpha_1,\ldots) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot t + \alpha_3 \cdot t^2 + \alpha_4 \cdot t^3 + \alpha_5 \cdot t^4 + \ldots$$

$$\Psi_5(\tau,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \operatorname{arctg}(\alpha_3 t + \alpha_4),$$

$$\Psi_6(\tau,\alpha_1,\ldots) = \sum_{j=1}^{m} \alpha_j \cdot \sin\left(\frac{\pi j}{2T}\right).$$

Тоді шукані параметри α_i у розглянутих функціях визначатимемо таким чином, щоб наблизитися до заданих значень $C(\xi_0,\tau_j)$ в сенсі мінімуму середньоквадратичного відхилення

$$S(\alpha_1,\ldots,\alpha_m) = \sum_{j=1}^{n} \left(C(\xi_0,\tau_j) - \Psi(\tau_j,\alpha_1,\ldots,\alpha_m)\right)^2, \quad (1)$$

за умов $\alpha_i > 0$.

IV. Методи пошуку оптимальних параметрів

Для оптимізації розв'язку $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1,\alpha_2,\ldots,\alpha_m)$ нелінійної задачі найменших квадратів (1) застосовано наступні методи:

Метод градієнтного спуску [5], алгоритм якого передбачає на кожному кроці оновлення параметрів

$$\boldsymbol{\alpha}_i^{(k+1)} = \boldsymbol{\alpha}_i^{(k)} - l\frac{\partial S(\boldsymbol{\alpha}_i)}{\partial \boldsymbol{\alpha}_i},$$

де $\boldsymbol{\alpha}_i^{(k)}$ – значення параметра на k -ій ітерації, l – швидкість навчання, тобто величина кроку на кожній ітерації, $\partial S(\boldsymbol{\alpha}_i)/\partial \boldsymbol{\alpha}_i$ – значення градієнту по кожному параметру.

Алгоритм повторюється до досягнення однієї з умов зупинки, наприклад, досягнута максимальна кількість ітерацій, норма градієнта стала меншою за наперед задане значення, функція помилки практично не змінюється, тощо.

Метод Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt, LM) [8] – це поєднання методу градієнтного спуску та методу Ньютона для знаходження мінімуму функції, що базується на найменших квадратах.

Для цього алгоритму на кожному кроці оновлюємо параметри за формулою

$$\boldsymbol{\alpha}_i^{(k+1)} = \boldsymbol{\alpha}_i^{(k)} + \Delta\boldsymbol{\alpha} .$$

Тут $\Delta\boldsymbol{\alpha}$ – величина оновлення параметрів, що визначається як розв'язок рівняння

$$(J^T J + \lambda I)\Delta\boldsymbol{\alpha} = J^T \mathbf{r} ,$$

де J – матриця Якобі (похідні залишків по параметрах), $\mathbf{r}$ – вектор лишків, елементи якого визначаються як $r_i = C(\xi_0, \tau_i) - \Psi(\tau_i, \boldsymbol{\alpha}_i)$, λ – коефіцієнт демпфування (регуляція перемикання алгоритму між методом градієнтного спуску та методом Ньютона), I – одинична матриця.

Метод довірчої області TRF (Trust Region Reflective) [9] передбачає, що на кожній ітерації обчислюється лінійна апроксимація функції залишків у точці

$$\mathbf{r}(\boldsymbol{\alpha} + \Delta\boldsymbol{\alpha}) \approx \mathbf{r}(\boldsymbol{\alpha}) + J\Delta\boldsymbol{\alpha} ,$$

та розв'язується задача найменших квадратів у довірчій області $\min_{\Delta\boldsymbol{\alpha}} \left\| \mathbf{r} + J\Delta\boldsymbol{\alpha} \right\|^2$ при $\left\| \Delta\boldsymbol{\alpha} \right\| \le \Delta$ (Δ – радіус довірчої області), враховуючи обмеження $\boldsymbol{\alpha}_{\min} \le \boldsymbol{\alpha} + \Delta\boldsymbol{\alpha} \le \boldsymbol{\alpha}_{\max}$. Обчислюємо, наскільки добре цей крок покращує реальну функцію. Якщо покращення суттєве, то приймаємо цей крок та збільшуємо довірчу область, у протилежному випадку крок відкидаємо та зменшуємо довірчу область.

Метод Dogbox (Dogleg) [6], ключовою особливістю якого є побудова кроку за алгоритмом Пауелла, що є опуклою комбінацією кроку Коші (крок вздовж напрямку найшвидгого спуску) та кроку Гауса-Ньютона. Метод Dogbox ефективний, оскільки потребує всього одного розв'язання лінійної системи за ітерацію та часто виявляється більш стійким, ніж класичний підхід Гауса-Ньютона з пошуком уздовж прямої.

Для порівняння також розглянуто *метод прямого пошуку по сітці*. Це простий, але обчислювально витратний підхід, який виконує повний перебір значень параметрів на заздалегідь заданій сітці $\boldsymbol{\alpha}_{\min} \le \boldsymbol{\alpha} \le \boldsymbol{\alpha}_{\max}$. Алгоритм оцінює цільову функцію у кожній точці цієї сітки та обирає параметри, що дають найкращий результат.

Методи довірчої області та Dogbox дають змогу враховувати обмеження на шукані параметри, що особливо важливо під час розв'язання задач, у яких отримані розв'язки мають узгоджуватися з фізичними процесами та природними обмеженнями системи.

V. Обчислювальний експеримент і аналіз результатів

Для проведення чисельної оптимізації параметрів функції, що задає граничну умову для концентрації домішкової речовини на нижній границі тіла, розроблено програмний модуль, який реалізує описані вище алгоритми та забезпечує порівняння отриманих результатів для різних типів апроксимуючих функцій. Програмну реалізацію здійснено мовою Python; для створення графічного інтерфейсу користувача застосовано бібліотеку PyQt, яка надала можливість розробити інтерактивне середовище для задання параметрів, запуску обчислень та аналізу отриманих результатів.

Для ілюстрації запропонованого підходу приведемо числові експерименти для невеликої кількості вхідних даних C_j , поданих у Таблиці 2.

Як приклад, в якості апроксимуючої функції використано функцію $\Psi_3(\tau, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$ та визначено невідомі параметри, використовуючи дані цієї таблиці.

ТАБЛИЦЯ II. Експериментальні значення шуканої функції для чисельного дослідження

Серія 1		*Серія 2*	
τ_j	C_j	τ_j	C_j
0	0	0	0
0.07	0.0007	0.05	0.001
0.14	0.0013	0.12	0.003
0.21	0.0175	0.20	0.015
0.28	0.0455	0.33	0.036
0.35	0.062	0.47	0.055
0.42	0.0725	0.58	0.069
0.49	0.0905	0.66	0.082
0.56	0.0965	0.79	0.091
0.63	0.098	0.92	0.095
0.7	0.098	1.0	0.097

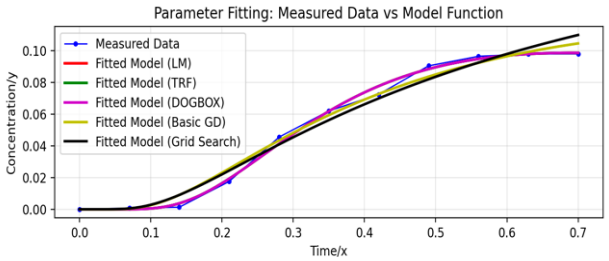
В якості початкових значень шуканих параметрів прийнято $\boldsymbol{\alpha} = (1, 1, 1, 1)$. Крім того, для методу прямого пошуку по сітці використано такі значення для сітки $\alpha_{\min} = 0.1$, $\alpha_{\max} = 2$, $\Delta\alpha = 0.1$. Зазначимо, що для даного числового експерименту додаткових обмежень на значення параметрів для методів довірчої області та Dogleg не накладалось. Отримані параметри та відповідні середньоквадратичні похибки для кожного методу, є наступними

Серія 1	*Серія 2*
LM метод:	*LM метод*:
α1 = 0.032264042	α1 = -8.593619524
α2 = 48.543469981	α2 = 9.328616297
α3 = 0.840721664	α3 = 0.678155741
α4 = 1.544771283	α4 = 0.011723912
Похибка: 0.000062163	Похибка: 0.000036942
TRF метод:	*TRF метод:*
α1 = 48.544331874	α1 = 0.056589635
α2 = 0.032264418	α2 = -1.797649114
α3 = 0.840722187	α3 = 0.558786769
α4 = -1.544777542	α4 = 1.547215129

Похибка: 0.000062163	Похибка: 0.000034807
Dogbox метод:	*Dogbox метод:*
α1 = 0.032273309	α1 = 0.049754130
α2 = 48.563889855	α2 = -57.31032440
α3 = 0.840733581	α3 = 0.803153472
α4 = 1.544922621	α4 = 2.194245302
Похибка: 0.000062163	Похибка: 0.000120164
Метод градієнтного спуску:	*Метод градієнтного спуску:*
α1 = -0.046294616	α1 = -0.023059898
α2 = 1.173746504	α2 = 0.954022388
α3 = 0.630153841	α3 = 0.692908363
α4 = 0.441725717	α4 = 0.407743884
Похибка: 0.000246033	Похибка: 0.000038651
Метод пошуку по сітці:	*Метод пошуку по сітці:*
α1 = 0.100000000	α1 = 0.100000000
α2 = 0.400000000	α2 = 0.100000000
α3 = 0.600000000	α3 = 0.600000000
α4 = 0.600000000	α4 = 0.500000000
Похибка: 0.000413166	Похибка: 0.000113159

На Рис. 1 подано графіки апроксимуючої функції $\Psi_3(\tau,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4)$ для двох серій, параметри якої визначено зазначеними методами оптимізації.

Серія 1



Серія 2

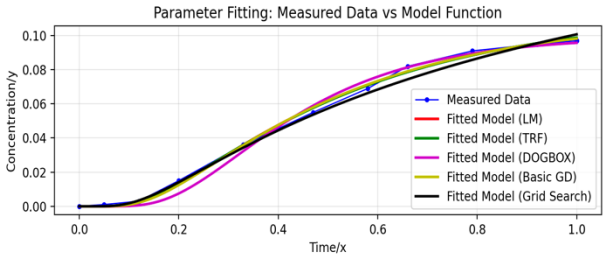


Рисунок 1. Функція $\Psi_3(\tau,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4)$, що апроксимує експериментальні дані, з параметрами, знайденими різними методами оптимізації

Для першого набору експериментальних даних, найменше значення похибки досягається для методів Левенберга-Марквардта, довірчої області та Dogbox методу, для другого – метод довірчої області. Проте, значення похідної від шуканої функції для першого набору даних $\Psi_3(\tau,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4)$ за одержаними параметрами для цих трьох методів у точці $\tau = 0.7$ є від'ємними, що суперечить фізичному процесу, який розглядається (концентрація домішкової речовини на нижній границі тіла природньо має бути зростаючою функцією). Відтак одним із додаткових критеріїв вибору оптимальних параметрів для шуканої функції є умова невід'ємних значень її градієнта.

Відповідно до цієї умови, для даного експерименту оптимальним вважаємо набір параметрів, знайдених методом градієнтного спуску. Водночас, даний критерій для методів довірчої області та Dogbox буде виконуватись, якщо під час виконання алгоритму додатково накласти обмеження на параметри $\alpha_i > 0$.

VI. Висновки

У роботі розглянуто задачу відновлення невідомої граничної умови для концентрації домішкової речовини на нижній поверхні пористого шару за експериментальними даними. Побудовано математичну модель масоперенесення з урахуванням дифузії, адвекції та сорбції, і сформульовано задачу оптимізації параметрів граничної умови з використанням нелінійних параметричних сімейств функцій. Розроблено програмний модуль, який реалізує низку методів чисельної оптимізації – градієнтний спуск, Левенберга-Марквардта, довірчої області, Dogbox та пошук по сітці. Модуль забезпечує проведення обчислювальних експериментів і порівняння результатів для різних типів апроксимуючих функцій. На основі вибірки експериментальних даних, виконано числовий аналіз та отримано оптимальні значення параметрів для кількох методів та проаналізовано вплив вибору алгоритму на точність апроксимації і фізичну узгодженість розв'язку. Показано, що методи довірчої області та Dogbox дозволяють враховувати обмеження на параметри, а додатковий критерій невід'ємності градієнта забезпечує фізичну коректність відновленої граничної умови.

Література

[1] T. Bandai and T. A. Ghezzehei, "Forward and inverse modeling of water flow in unsaturated soils with discontinuous hydraulic conductivities using physics-informed neural networks with domain decomposition," Hydrol. Earth Syst. Sci., vol. 26, pp. 4469–4495, 2022, doi: 10.5194/hess-26-4469-2022.

[2] Y. Chaplya and O. Chernukha, Physical-mathematical modelling heterodiffusive mass transfer. Lviv, Ukraine: SPOLOM, 2003.

[3] O. Chernukha, P. Pukach, H. Bilushchak, Y. Bilushchak, and M. Vovk, "Advanced statistical approach for the mathematical modeling of transfer processes in a layer based on experimental data at the boundary," Symmetry, vol. 16, p. 802, 2024, doi: 10.3390/sym16070802.

[4] D. Das, E. Coello, R. Schulte, and B. Menze, "Quantification of metabolites in magnetic resonance spectroscopic imaging using machine learning," in Proceedings of MICCAI 2017, pp. 462–470, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-66179-7_53.

[5] C. Lemaréchal, "Cauchy and the gradient method," in Optimization Stories, M. Grötschel, Ed. Documenta Mathematica Series, vol. 6, EMS Press, pp. 251–254, Jan. 2012, doi: 10.4171/dms/6/27.

[6] M. L. A. Lourakis and A. A. Argyros, "Is Levenberg–Marquardt the most efficient optimization algorithm for implementing bundle adjustment?," in Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05), vol. 2, Beijing, China, 2005, pp. 1526–1531, doi: 10.1109/ICCV.2005.128.

[7] C. Madie Yonti, R. Mérimé Nonki, D. Dansi, F. Nkili, and F. Togue Kamga, "Effect of adsorption coefficient and sorption intensity on the spatiotemporal variation of contaminant concentration in saturated porous media using the fractional advection–dispersion equation," Discover Applied Sciences, vol. 7, pp. 1–13, 2025, doi: 10.1007/s42452-025-06903-8.

[8] D. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," SIAM J. Appl. Math., vol. 11, pp. 431–441, 1963.

[9] J. J. Moré and D. C. Sorensen, "Computing a trust region step," SIAM J. Sci. Stat. Comput., vol. 3, pp. 553–572, 1983.

Дослідження впливу нерівномірного розподілу волокон на механічні властивості композитів на основі воксельних моделей

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.091

Владислав Жихарєв
Аспірант кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
м. Харків, Україна
vladyslav.zhykhariev@infiz.khpi.edu.ua

Сергій Місюра
Доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
м. Харків, Україна
serhii.misiura@khpi.edu.ua

Марія Шаповалова
Доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
м. Харків, Україна
Mariia.Shapovalova@khpi.edu.ua

Олексій Водка
Доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
м. Харків, Україна
oleksii.vodka@khpi.edu.ua

Анотація— ***У роботі представлено результати чисельного та експериментального дослідження впливу нерівномірного розподілу волокон у волокнистих композитах. Для моделювання нерівномірного розподілу використано нормальний (гаусів) розподіл із рівнями зміщення 5%, 10% та 15% відносно ідеальної гексагональної структури. Проведені чисельні розрахунки дозволили оцінити вплив статистичних відхилень мікроструктури на пружні характеристики композиту. Додатково застосовано методи комп'ютерного зору для аналізу мікрофотографій реальних композитів, що дало змогу порівняти результати моделювання з реальною структурою матеріалів.***

Ключові слова — ***волокнисті композити; нерівномірний розподіл; пружні властивості; чисельне моделювання; комп'ютерний зір.***

I. Вступ

Поведінка волокнистих композитів значною мірою визначається просторовим розподілом волокон у матриці. Ідеальні регулярні структури часто використовуються в аналітичних та чисельних моделях [1], проте в реальних матеріалах відхилення від такої організації є неминучими через технологічні особливості виготовлення, неоднорідність матеріалу та випадкові дефекти. Такі відхилення призводять до формування локальних зон концентрації напружень, що впливає на однорідність механічних властивостей, міцність та довговічність композиту [2]. Тому для реалістичного прогнозування поведінки матеріалу необхідно враховувати мікроструктурні нерівномірності та випадкові зміщення волокон.

У цьому дослідженні зосереджено увагу на впливі нерівномірного розташування волокон на розподіл механічних характеристик композиту. Для моделювання було розроблено чисельну воксельну модель, у якій положення центрів волокон задавалося за гаусівським законом. Такий підхід дозволяє імітувати реальні відхилення від регулярної структури та дослідити їхній вплив на локальні та макроскопічні властивості матеріалу. Отримані чисельні результати порівнювалися з експериментальними даними, отриманими з мікрофотографій реальних зразків за допомогою методів комп'ютерного зору [3-5], що забезпечує верифікацію моделі та підвищує достовірність прогнозів механічної поведінки композиту.

II. Чисельне моделювання

Для дослідження була розроблена чисельна модель, що дозволяє дискретизувати матеріал на об'ємні елементи (вокселі), кожен з яких характеризується механічними властивостями відповідної фази — волокна або матриці.

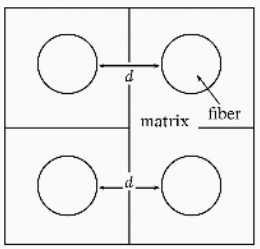


Рис.1 Схема композитного матеріалу з регулярним та симетричним розташуванням волокон

Модель розглядає мікрочастину композиту, що включає декілька волокон у матриці, яка виступає як базовий елемент для аналізу локальної поведінки матеріалу. Для відтворення реалістичної структури

волокон у моделі їхні координати задаються із випадковими зміщеннями від періодичного розташування відповідно до нормального (гаусівського) розподілу:

$$x' = x_0 + \Delta x,\ \Delta x \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (1)$$

$$y' = y_0 + \Delta y,\ \Delta y \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (2)$$

x_0, y_0 — координати ідеального розташування волокон,

Δx, Δy — випадкові зміщення, що підкоряються нормальному (гаусівському) розподілу $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$,

σ — стандартне відхилення, що задає рівень нерівномірності розподілу волокон.

Вибір різних значень σ дозволяє моделювати різні рівні нерівномірності розподілу волокон у мікрочастині композиту.

Було проведено серію чисельних експериментів із різними параметрами випадкових відхилень, що дало змогу виявити залежність між величиною випадкових відхилень у розташуванні волокон і рівномірністю механічної відповіді матеріалу.

Такий підхід дозволяє ефективно інтегрувати чисельні результати з експериментальними даними, отриманими з мікрофотографій реальних зразків композиту, та підвищує достовірність прогнозів механічної поведінки матеріалу.

III. Аналіз мікроструктури за допомогою комп'ютерного зору

Для співставлення чисельних моделей із реальними зразками композитів було розроблено методику кількісного аналізу мікрофотографій на основі комп'ютерного зору. Основна мета — визначити точні координати центрів волокон, середні діаметри та просторову концентрацію, а потім порівняти реальне розташування волокон із аналітичним (регулярним) розподілом.

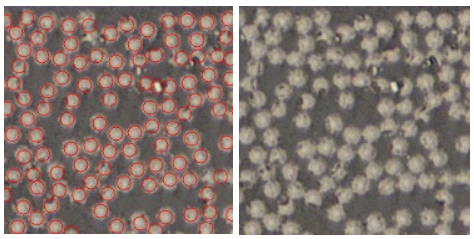


Рис.2 Приклад роботи комп'ютерного зору – виявлення об'єктів (ліворуч: з позначками; праворуч: оригінальне зображення мікроструктури)

За допомогою цього підходу виконуються такі завдання:

- Виявлення центрів волокон у мікрофотографіях для подальшого статистичного аналізу;
- Вимірювання середнього діаметра волокон для оцінки геометричної однорідності матеріалу;
- Оцінка концентрації волокон у відсотках від площі аналізованої ділянки, що дозволяє кількісно визначити щільність волокон у реальному зразку;
- Порівняння реального та аналітичного розподілу волокон, що дає змогу розрахувати рівень нерівномірності в реальній мікроструктурі.

Отримані дані дозволяють кількісно оцінити відхилення реальної структури композиту від регулярної, що є критично важливим для уточнення параметрів воксельної чисельної моделі та коректного прогнозування локальних концентрацій напружень. Таким чином, цей метод забезпечує об'єктивне порівняння синтетичних і реальних мікроструктур, підвищуючи точність моделювання механічної поведінки композитів.

Висновки

Проведені дослідження показали, що навіть незначні випадкові зміщення волокон у межах 5–15% від міжволоконної відстані здатні впливати на локальні концентрації напружень та на ефективні механічні характеристики композиту. Використання чисельних воксельних моделей дозволило оцінити залежність однорідності матеріалу від рівня нерівномірності розподілу волокон, що є ключовим для прогнозування його міцності та довговічності.

Застосування методів комп'ютерного зору дало змогу кількісно оцінити реальне розташування волокон, визначити середні діаметри та координати центрів, а також порівняти реальні мікроструктури із синтетичними (модельними). Таке порівняння є важливим етапом валідації чисельної моделі, дозволяючи уточнювати параметри розподілу волокон і підвищувати достовірність прогнозів механічної поведінки композиту.

Таким чином, поєднання воксельного моделювання та методів комп'ютерного зору створює ефективний інструментарій для кількісного аналізу мікроструктури та оптимізації механічних характеристик волокнистих композитів.

Література

[1] F. Yıldırım, "Micromechanical modeling of basalt fiber and glass fiber reinforced PA66 matrix composite materials," Uludağ Univ. J. Fac. Eng., vol. 30, no. 1, pp. 87–106, 2025.

[2] D. Micota, A. Isaincu, and L. Marsavina, "Micromechanical modeling of glass fiber reinforced plastic material," Mater. Today: Proc., vol. 45, no. 5, pp. 4330–4336, 2021.

[3] K. Alrfou, A. Kordijazi, et al., "Computer vision methods for the microstructural analysis of materials: The state-of-the-art and future perspectives," arXiv:2208.04149, 2022.

[4] B. L. DeCost and E. A. Holm, "A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data," Comput. Mater. Sci., vol. 110, pp. 126–133, 2015.

[5] J. Cheng, et al., "Computer vision analysis on material characterization images," Adv. Intell. Syst., vol. 4, no. 2, p. 2100158, 2022.

MCIT Modeling, control & information technologies

Математичне моделювання та прогнозування керованих рухів поверхневих та підземних вод

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.092

Андрій Бомба
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
a.ya.bomba@nuwm.edu.ua

Сергій Каштан
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
s.s.kashtan@nuwm.edu.ua

Анотація — **Методи комплексного аналізу застосовано до дослідження керованих рухів поверхневих та підземних вод у гідрологічних системах (водних об'єктах, наприклад, річках з притоками), обмежених лініями течії та еквіпотенціальними лініями. Повільні, близькі до ідеальних, рухи водних мас пропонується описувати за допомогою аналогів закону Дарсі, враховуючи як поверхневі так і підземні води, вплив яких моделюється як джерела поперечних збурень базового стоку. Методологія моделювання таких процесів базується на розвитку та адаптації числових методів комплексного аналізу, зокрема на переході до обернених крайових задачах на конформні відображення. Це дозволяє моделювати структуру течії; знаходити функцію течії та комплексний потенціал; розраховувати витрати, перетоки, поле швидкості; будувати гідродинамічну сітку руху; приймати рішення щодо керування водними ресурсами. Такий підхід відкриває можливість створення інтелектуальних систем прогнозування гідрологічного режиму водного об'єкту.**

Ключові слова — математичне моделювання, керування, числові методи, інтелектуальні системи, цифрові двійники, машинне навчання, нелінійні крайові задачі, конформні відображення, основний потік водних мас, джерело збурень

I. Вступ

Гідрологічні системи на сьогодні є дуже активною галуззю досліджень. До факторів, які сприяють цьому, зокрема, відносять: зростаючу в останні десятиліття мінливість, спричинену зміною гідрокліматичних умов [1]; частоту та інтенсивність екстремальних явищ, які посилюються зі зміною клімату [2]; зростаючий вплив людини на водні ресурси, що призводить до збільшення потреб у воді та енергії в глобальному масштабі [3].

У дослідженні [4] підкреслено, що управління водними ресурсами набуває критичного значення в умовах зростаючої гідрокліматичної мінливості та інтенсивного антропогенного навантаження. Сучасна інженерна гідравліка та гідрогеоекологія пріоритетно спрямовані на забезпечення стійкого розвитку та впровадження адаптивного управління. Керовані рухи води, що включають регулювання стоку, мінімізацію паводкових ризиків та оптимізацію інфільтраційного живлення, вимагають відходу від статичних інженерних оцінок на користь динамічних прогностичних моделей, здатних працювати в режимі реального часу [4].

Математичне моделювання надає можливість проаналізувати характер процесів, які впливають на стан водного об’єкту, передбачити їхній розвиток у майбутньому, що є важливим під час прийняття управлінських рішень. У багатьох випадках практики формули для знаходження характеристик середовища потребують задання функції швидкості. В реальних фізичних задачах, зокрема в задачах гідрології, фільтрації, часто це зробити або неможливо, або дуже складно. Математичне моделювання гідравлічних процесів є невід'ємною частиною сучасних гідрологічних досліджень водних об'єктів та дозволяє ефективно емулювати відповідні процеси, зокрема, за допомогою сурогатних моделей на основі методів машинного навчання [5].

У цій роботі започатковано вивчення зазначеної проблеми і запропоновано вплив як поверхневих так і підземних вод, що живлять основну течію (наприклад, притоки до водойми, скиди у водойму) або живляться за рахунок основної течії (наприклад, водозабірні насоси, стоки підземних/ґрунтових вод), на початковому етапі моделювати як ділянки (джерела) поперечних збурень базового стоку [6].

У роботах [7 – 9] широко використано метод обернених крайових задач (конформних відображень) для побудови гідродинамічної сітки потенційних та квазіпотенційних полів різних процесів та поля швидкості з паралельним розрахунком різних інших характеристик (витрат, величин перетоків тощо). Як відомо [9], за допомогою введення функції течії $\psi=\psi(x,y)$, комплексно спряженої до шуканого потенціалу $\varphi=\varphi(x,y)$, задачі в областях, обмежених лініями течії та еквіпотенціальними лініями, зводяться до конформного відображення $\omega=\omega(z)=\varphi(x,y)+i\psi(x,y)$ фізичної області на

відповідну область комплексного потенціалу – внутрішність многокутника з вертикальними та горизонтальними ділянками його границі.

II. Загальна постановка задачі

Розглядається водний об'єкт – водойма (зокрема, річка) з притоками, як однозв'язна криволінійна чотирикутна область G_z $(z=x+\mathrm{i}y)$, обмежена чотирма гладкими кривими $AB=\{z: f_1(x,y)=0\}$, $BC=\{z: f_2(x,y)=0\}$, $CD=\{z: f_3(x,y)=0\}$, $DA=\{z: f_4(x,y)=0\}$, які в точках A, B, C, D перетинаються під прямими кутами, за таких умов: $\varphi\big|_{AB}=\varphi_*$, $\varphi\big|_{CD}=\varphi^*$, $\left.\frac{d\varphi}{dn}\right|_{L_л^*}=\left.\frac{d\varphi}{dn}\right|_{L_n^*}=0$, де $\vec{n}$ – нормаль до відповідної кривої, $L_л^*=BC\setminus\bigcup_{k=0}^{s}M_{2k+1}N_{2k+1}$, $L_n^*=AD\setminus\bigcup_{k=1}^{r}M_{2k}N_{2k}$.

Оскільки течію вважаємо ідеальною, то, як відомо [9], швидкість руху можемо описати законами $\vec{\upsilon}=grad\,\varphi(x,y)$, $div\,\vec{\upsilon}=0$. А ділянки M_kN_k впадання приток на лівому ($k=1,3,...,2s+1$) та правому ($k=2,...,2r$) берегах ототожнюються з джерелами збурень вихідного потоку водних мас вздовж граничних ліній BC та AD основної течії відповідно (рис. 1). Причому, притік до русла можна розглядати як гідравлічний, так і фільтраційний, а потенціал φ можна визначити через напір та гідравлічну провідність або коефіцієнт фільтрації відповідно (для зручності викладок вважатимемо, що ці коефіцієнти дорівнюють одиниці).

Нехай на цих ділянках (притоках) M_kN_k маємо потенціали $\varphi\big|_{M_kN_k}=\varphi_k^\circ$, причому $\varphi_*<\varphi_k^\circ<\varphi^*$. Залежно від їхніх значень та співвідношень між ними можливі різні випадки формування структури течії у фізичній області G_z (водному об'єкті), які, зокрема, характеризуються положенням ліній розділу ділянок потоків водних мас, що при цьому утворюються [6 – 9].

Аналогічно до [6, 9], задача полягає у знаходженні характеристичної функції течії, що забезпечує можливість паралельного знаходження комплексного потенціалу, повної витрати потоку, величин різних перетоків, побудови у розглядуваній області гідродинамічної сітки руху та кривих розділу водних мас, розрахунку поля швидкості руху.

Розглядається один з можливих випадків [6] формування структури течії у водному об'єкті – області G_z, а саме ключовий випадок, коли $\varphi_*<\varphi_1^\circ<\varphi_3^\circ<\varphi^*$ за компенсаційної умови $K=M_3$, при цьому область комплексного потенціалу G_ω матиме вигляд, наведений на рис.2.

III. Обернена задача

Обернена нелінійна крайова задача на конформне відображення області G_ω на область G_z для невідомих $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q$ у диференціальній формі запишеться у вигляді [6]:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial y}{\partial\psi}=\dfrac{\partial x}{\partial\varphi},\ \dfrac{\partial x}{\partial\psi}=-\dfrac{\partial y}{\partial\varphi},\ (\varphi,\psi)\in G_\omega;\end{cases}\qquad(1)$$

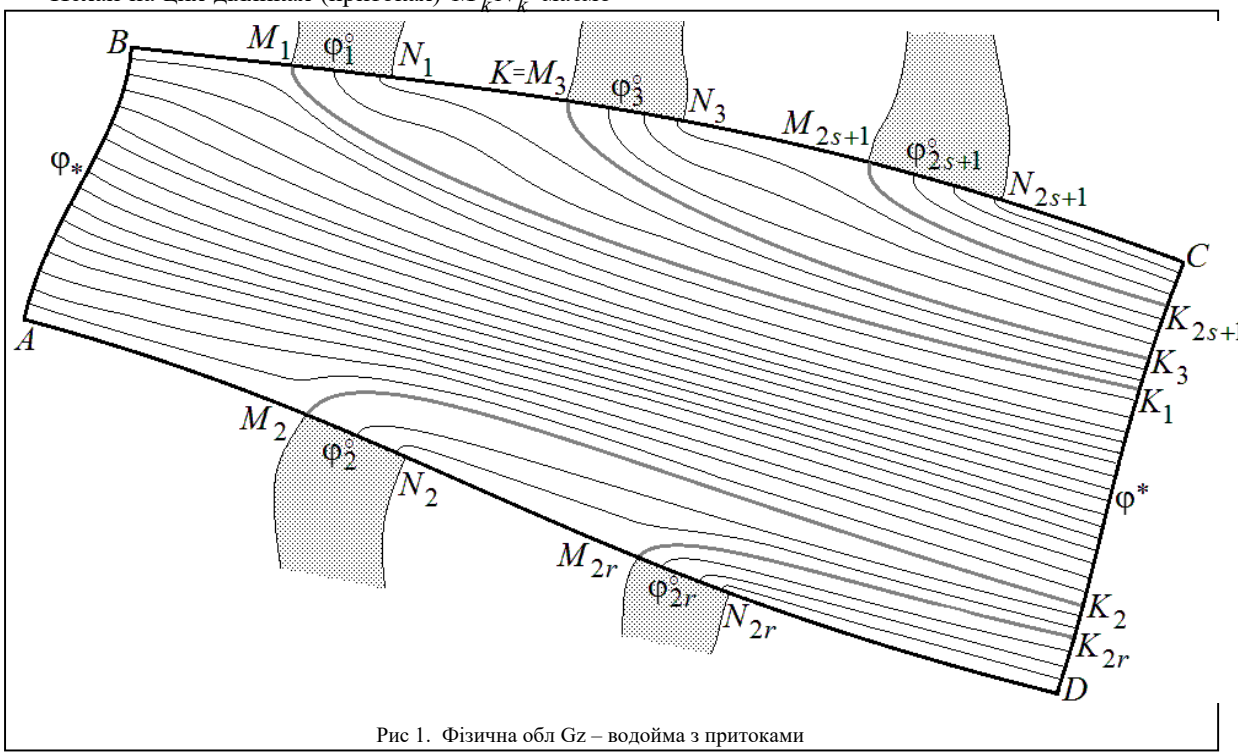


Рис 1. Фізична обл Gz – водойма з притоками

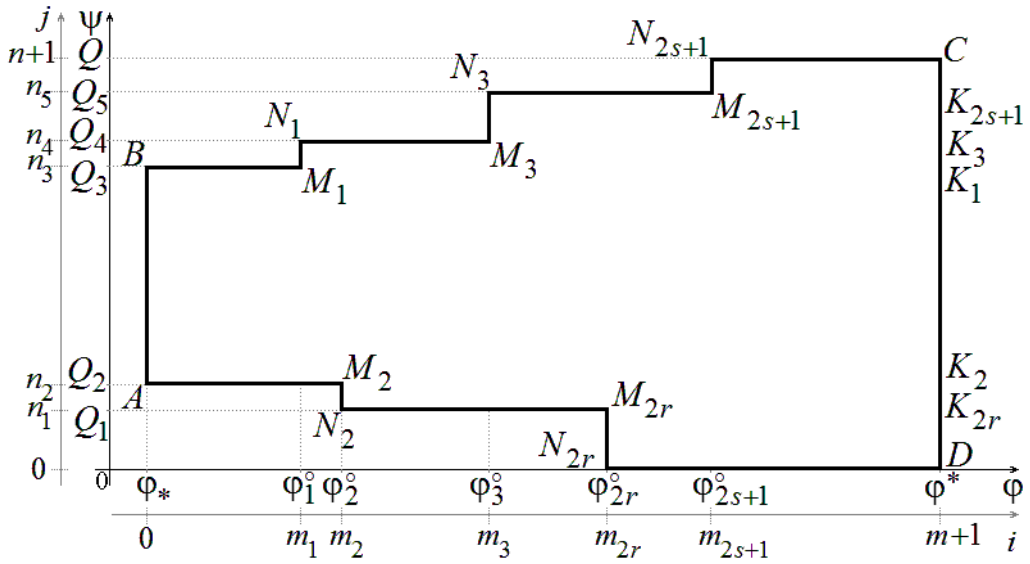


Рис 2. Область комплексного потенціалу G_ω та параметри її апроксимації

$$
\begin{cases}
f_1\left(x(\varphi_*,\psi),y(\varphi_*,\psi)\right)=0, & Q_2\le\psi\le Q_3,\\
f_2\left(x(\varphi,Q_3),y(\varphi,Q_3)\right)=0, & \varphi_*\le\varphi\le\varphi_1^\circ,\\
f_2\left(x(\varphi_1^\circ,\psi),y(\varphi_1^\circ,\psi)\right)=0, & Q_3\le\psi\le Q_4,\\
f_2\left(x(\varphi,Q_4),y(\varphi,Q_4)\right)=0, & \varphi_1^\circ\le\varphi\le\varphi_3^\circ,\\
f_2\left(x(\varphi_3^\circ,\psi),y(\varphi_3^\circ,\psi)\right)=0, & Q_4\le\psi\le Q_5,\\
f_2\left(x(\varphi,Q_5),y(\varphi,Q_5)\right)=0, & \varphi_3^\circ\le\varphi\le\varphi_{2s+1}^\circ,\\
f_2\left(x(\varphi_{2s+1}^\circ,\psi),y(\varphi_{2s+1}^\circ,\psi)\right)=0, & Q_5\le\psi\le Q,\\
f_2\left(x(\varphi,Q),y(\varphi,Q)\right)=0, & \varphi_{2s+1}^\circ\le\varphi\le\varphi^*,\\
f_3\left(x(\varphi^*,\psi),y(\varphi^*,\psi)\right)=0, & Q\ge\psi\ge 0,\\
f_4\left(x(\varphi,0),y(\varphi,0)\right)=0, & \varphi^*\ge\varphi\ge\varphi_{2r}^\circ,\\
f_4\left(x(\varphi_{2r}^\circ,\psi),y(\varphi_{2r}^\circ,\psi)\right)=0, & 0\le\psi\le Q_1,\\
f_4\left(x(\varphi,Q_1),y(\varphi,Q_1)\right)=0, & \varphi_{2r}^\circ\ge\varphi\ge\varphi_2^\circ,\\
f_4\left(x(\varphi_2^\circ,\psi),y(\varphi_2^\circ,\psi)\right)=0, & Q_1\le\psi\le Q_2,\\
f_4\left(x(\varphi,Q_2),y(\varphi,Q_2)\right)=0, & \varphi_2^\circ\ge\varphi\ge\varphi_*,
\end{cases}
\qquad (2)
$$

де Q – сумарний потік, що виходить із області G_z через ділянку границі CD, а Q_1, Q_2-Q_1, Q_3-Q_2, Q_4-Q_3, Q_5-Q_4, $Q-Q_5$ – величини потоків, що входять в область G_z через ділянки $M_{2r}N_{2r}$, M_2N_2, AB, M_1N_1, M_3N_3, $M_{2s+1}N_{2s+1}$ відповідно.

Задача (1), (2) зводиться до задачі відшукання розв'язку рівнянь Лапласа в області G_ω за нелінійних крайових умов (2) та умов Коші–Рімана (1) на границі області G_ω.

Наближений розв'язок цієї задачі отримується як розв'язок різницевого аналогу задачі (1), (2) у відповідній нерівномірній сітковій області комплексного потенціалу за допомогою алгоритму, побудованого на основі [6, 9], який ґрунтується на почерговій параметризації величин конформних інваріантів, граничних і внутрішніх вузлів сіткової області G_z з використанням ідей методу блочної ітерації [10].

Висновки

Керовані рухи поверхневих та підземних вод є складною кіберфізичною задачею, де прогностична точність моделей та обчислювальна ефективність алгоритмів взаємодіють з фундаментальними законами гідродинаміки для забезпечення стійкості та надійності водогосподарських систем.

На основі модифікованого числового методу комплексного аналізу розв'язання конкретних типів задач на конформні відображення областей комплексного потенціалу (з вертикальними та горизонтальними розрізами) на відповідні фізичні області з криволінійними ділянками границі (лініями течії та еквіпотенціальними лініями), побудовано алгоритм, що дозволяє знаходити потенціали та характеристичну функцію течії, а отже і поля швидкості руху, будувати лінії розділу течії та гідродинамічну сітку руху, обчислювати різні інтегральні параметри (перетоки, витрати тощо), передбачати наслідки певних видів катастроф (зокрема, підтоплень). Розроблений підхід також дозволяє ширше аналізувати гідрологічні процеси, планувати водогосподарську та гідротехнічну інфраструктуру, прогнозувати ризики та приймати відповідні обґрунтовані рішення щодо водокористування, управління водними системами та захисту екосистеми водного об'єкту.

Напрямом майбутніх досліджень може бути узагальнення запропонованого підходу до вивчення більш глобальних процесів руху поверхневих і підземних вод, його поширення на випадки неоднорідних, анізотропних, схильних до деформацій середовищ, зокрема, басейнів річок та морів з урахуванням взаємодії підземних ґрунтових вод і поверхневих водних мас.

Також, перспективним напрямом досліджень гідрологічних систем є гідроінформатика та цифрові двійники. Технологія цифрових двійників є інтеграційною платформою, що дозволяє поєднати математичне моделювання фізичного процесу, високопродуктивні обчислювальні технології та машинне навчання для подолання обмежень оперативного управління процесом. У контексті цього дослідження технологія цифрових двійників інтегрує математичні моделі, що описують поведінку системи (такі як закон А.Дарсі та рівняння нерозривності); високопродуктивні обчислювальні технології, що забезпечують обмін даними між фізичним і віртуальним світом; дані моніторингу реальних гідрологічних систем (річка, водосховище, водоносний горизонт) та прогностичні моделі машинного навчання, як аналітичний інструмент для обробки даних і надання рекомендацій. Реалізація цифрового двійника дозволяє розробляти математичні та цифрові моделі гідрологічної системи, програмувати її поведінку та забезпечувати людино-машинну взаємодію між водним об'єктом та його моделлю.

Таким чином, технологія цифрових двійників перетворює математичне моделювання з інструменту прогнозування на інструмент операційної безпеки та стійкості. Це має вирішальне значення в гідравлічних системах, де помилки можуть призвести до певних видів катастроф, наприклад, руйнування гідроспоруд та/або появи паводків.

Література

[1] V. Sreeparvathy, and V. V. Srinivas, “Global assessment of spatiotemporal variability of wet, normal and dry conditions using multiscale entropy-based approach,” Scientific Reports, Volume 12, Issue 1, Article 9767, 2022, DOI: http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-13830-w.

[2] S. Stevenson, S. Coats, D. Touma, J. Cole, F. Lehner, J. Fasullo, and B. Otto-Bliesner, “Twenty-first century hydroclimate: A continually changing baseline, with more frequent extremes,” Proceedings of the National Academy of Sciences, Volume 119, Issue 12, Article e2108124119, 2022, DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.2108124119.

[3] A. Boretti, and L. Rosa, “Reassessing the projections of the World Water Development Report,” npj Clean Water, Volume 2, Article 15, 2019, DOI: https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9.

[4] A. Castelletti, A. Ficchì, A. Cominola, P. Segovia, M. Giuliani, W. Wu, S. Lucia, C. Ocampo-Martinez, B. D. Schutter, and J. M. Maestre, “Model Predictive Control of water resources systems: A review and research agenda,” Annual Reviews in Control, Volume 55, pp. 442-465, 2023, URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578823000172, DOI: https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.013.

[5] R. Huang, C. Ma, J. Ma, X. Huangfu, and Q. He, “Machine learning in natural and engineered water systems,” Water Research, Volume 205, Article 117666, 2021, DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117666.

[6] А. Я. Бомба, С. С. Каштан, “Методи комплексного аналізу прогнозування керованих рухів поверхневих та фільтраційних вод,” Кібернетика та системний аналіз, Т.61, №5, с.39-54, 2025, DOI: https://doi.org/10.34229/KCA2522-9664.25.5.4.

[7] А. Я. Бомба, С. С. Каштан, “Нелінійні обернення крайових задач на конформні відображення з потенціалом керування,” Математичні методи та фізико-механічні поля, Т. 45, № 3, с. 69-76, 2002, URL: http://journals.iapmm.lviv.ua/ojs/index.php/MMPMF/article/view/2925.

[8] A. Y. Bomba, S. S. Kashtan, and V. V. Skopetskii, “Nonlinear inverse boundary-value problems of conformal mapping with a controlling potential,” Cybernetics and Systems Analysis, Volume 40, Issue 1, pp. 58-65, 2004, DOI: https://doi.org/10.1023/B:CASA.0000028100.70341.57.

[9] А. Я. Бомба, С. С. Каштан, Д. О. Пригорницький, С. В. Ярощак, “Методи комплексного аналізу,” Рівне: НУВГП, 2013.

[10] J. M. Ortega and W. C. Rheinboldt, “Iterative solution of nonlinear equations in several variables,” New York, London: Academic Press, 1970, DOI: https://doi.org/10.1016/C2013-0-11263-9.

Параметрична оптимізація регуляторів векторного управління інвертором

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.093

Микола Клепач
Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
m.i.klepach@nuwm.edu.ua

Марко Клепач
Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
m.m.klepach@nuwm.edu.ua

Яніслав Федоров
Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
fedorov_ak22@nuwm.edu.ua

Анотація — **досліджено модель автоматичної системи векторного управління статичного синхронного компенсатори реактивної потужності трифазного споживача електричної енергії, оптимізовано параметри регулятора стабілізації напруги інвертора. Результати можуть бути використані при реалізації пристрою мікропроцесорними засобами автоматизації.**

Ключові слова — синхронні компенсатори реактивної потужності, автономні інвертори напруги, векторне управління, оптимізація параметрів PID-регуляторів.

I. Вступ

Із розвитком напівпровідникової техніки та DSP мікроконтролерів, швидкодіючих IGBT і MOSFET транзисторів, а також давачів струму і напруги на основі ефекту Хола з'явилася можливість реалізації активних силових пристроїв для покращення якості електроенергії електричних мереж. Основними елементами активних фільтрів електроенергії є автономний інвертор включений паралельно чи послідовно із нелінійним навантаженням, накопичувач електричної енергії та система управління.

У залежності від стратегії управління ці пристрої дозволяють формувати на навантаженні напругу з необхідними параметрами та регулювати їх у широких межах. Вони споживають із електричної мережі струм близький до синусоїдального при нульовому значенні реактивної потужності та забезпечують електромагнітну сумісність пристроїв.

Сучасними досконалими технічними засобами для регулювання реактивної енергії і симетрування навантажень є статичні синхронні компенсатори ─ СТАТКОМ. Вони забезпечують компенсацію реактивної потужності, дозволяють підтримувати стабільну напругу в мережі та підвищують її якість.

Високопродуктивним методом керування інверторами напруги в цих пристроях є векторний метод керування, який забезпечує миттєву корекцію модулів та фаз генерованих струмів. Техніка векторного управління трифазних інверторів потребує використання засобів моделювання, та оптимізації параметрів вбудованих регуляторів

II. Моделювання статичного компенсатора реактивної потужності

За принципом дії компенсатор реактивної потужності є синхронним джерелом напруги під'єднаним паралельно до активно-індуктивного навантаження (Load) через LCL фільтр. Трифазний мостовий інвертор (INVERTER) побудований за мостовою схемою на IGBT-транзисторах включає також накопичувальний конденсатор. Інвертор генерує реактивну потужність, яка в точці під'єднання компенсує реактивну потужність споживану навантаженням[1].

У процесі проведення досліджень нами побудовано Simulink-модель силової частини із засобами вимірювання (рис.1). В наведеній віртуальній фізичній моделі компенсатора використано блоки Power Electronics з бібліотеки Simscape [2]. У процесі моделювання для системи задано наступні параметри. Живлення споживача з активною потужністю 200 kW та індуктивною 100 kvar відбувається від мережі 0.4 кV. На стороні постійного струму інвертора підтримується постійна напруга Udc=800 V. Частота широтно-імпульсної модуляції фіксована 10 кHz.

Для оптимізації параметрів PI-регуляторів використано блок оптимізації нелінійних систем Check Step Response Characteristics.

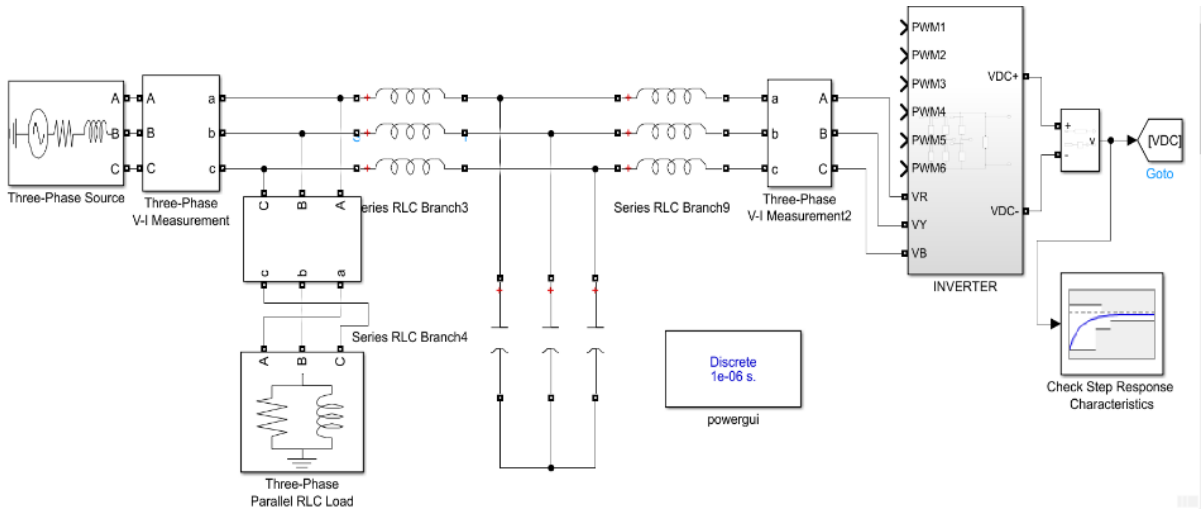


Рисунок 1. Simulink-модель силової частини компенсатора

Для реалізації векторного управління інвертором побудована модель прямих перетворень координатних систем Кларк і Парка (рис.2).

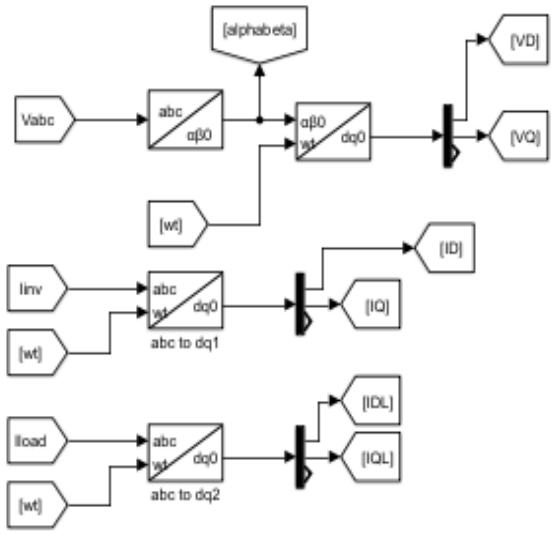


Рисунок 2. Модель перетворювачів координат

Фазове автопідстроювання частоти (PLL Phase-locked Loop) синхронізується за прямою послідовністю вхідної напруги V1.

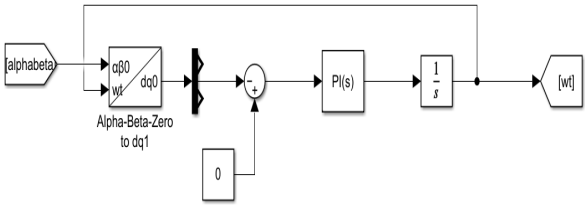


Рис.3. Модель АСР автопідстроювання частоти

Вихідне значення автоматичної системи підстроювання частоти Θ=ωt використовується при обчисленнях дійсної (поздовжньої) VD і реактивної (поперечної) складової VQ вхідної напруги Vabc в обертовій системі координат dq.

Вимірювані миттєві значення струмів навантаження Iload та інвертора Iinv перераховуються у відповідні складові цих струмів в системі координат, яка обертається з кутовою частотою ω синхронно з напругою фази A. На рис.2 ці струми мають позначення IDL, IQL та ID, IQ.

Складова ID збігається по фазі із напругою регулюючи потік активної потужності, тоді як складова IQ відповідає за величину реактивної потужності генерованої інвертором.

Система векторного управління складається із двох каналів: - схеми стабілізатора напруги каналу постійного струму VDC і регулятора реактивної складової струму навантаження IQ та оберненого перетворювача координат від рухомої системи dq0 до трифазної системи abc. (рис.4)[3].

На основі виміряних значень параметрів здійснюється обрахування сигналу завдання, що являє собою різницю між ідеальною (заданою) синусоїдою та струмом навантаження в вибраній системі координат На основі отриманого сигналу завдання після зворотного перетворення координат отримуємо керуючий ШІМ сигнал в векторній формі, під дією якого силова частина активного фільтра шляхом комутації силових ключів задає струм інвертора, який компенсує спотворюючий струм нелінійного навантаження.

Ефективність роботи синхронного компенсатора реактивної потужності залежить від якості автоматичного регулювання каскадної системи стабілізації напруги на виході інвертора. В системі регулювання задіяні два регулятори коректуючий PID controler1 та стабілізуючий PID controler2 .

Алгоритми роботи цифрових PI-регуляторів в системі стабілізації напруги на виході автономного інвертора напруги описується дискретною передаточною функцією:

$$W_{PID}(z) = P + IT_0 \frac{1}{z-1}$$

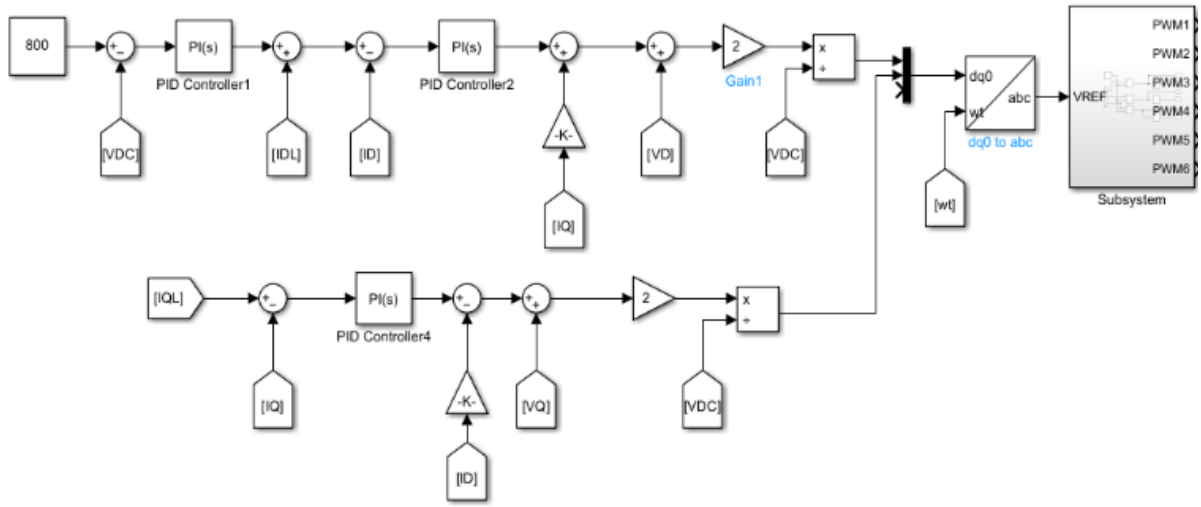


Рисунок 4. Simulink-модель системи векторного управління СТАТКОМ

III. Результати моделювання

Засоби пакету MATLAB дозволяють оперативно здійснити параметричний синтез регуляторів каскадної автоматичної системи регулювання. На рис.5. показано налаштування блоку оптимізації нелінійних систем Check Step Response Characteristics для системи стабілізації напруги VDC.

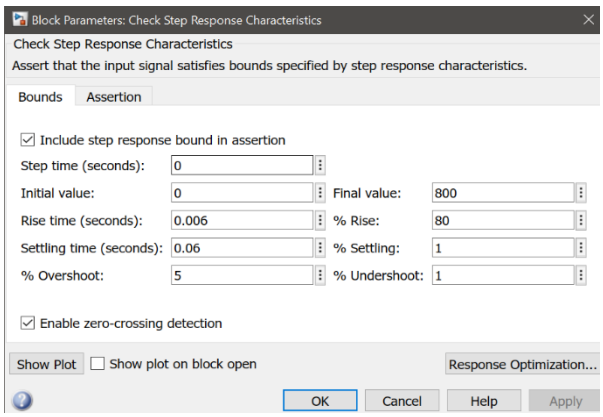


Рисунок 5. Вікно параметрів блока Check Step Response Characteristics

Перехідні характеристики АСР напруги інвертора отримані в результаті оптимізації наведено на рис.6.

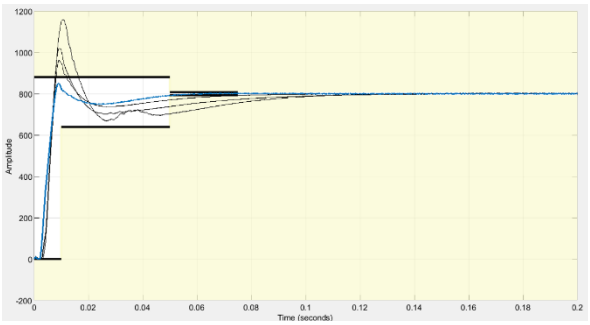


Рис.6. Перехідні характеристики АСР напруги інвертора

За результатами моделювання та оптимізації регуляторів отримано оптимальні значення параметрів регуляторів (рис.7):

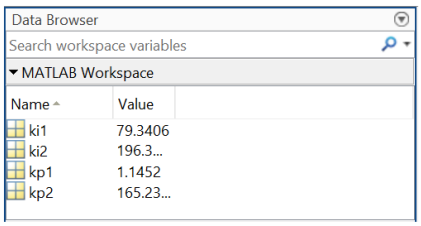


Рисунок 7. Оптимальні значення параметрів регуляторів

Отримані значення параметрів kp1 та kp2 відповідають пропорційній складовій, а ki1 та ki2 – інтегральній складовій коректуючого та стабілізуючого регулятора відповідно.

IV. Висновки

Отримані у результаті оптимізації параметри регуляторів активного випрямляча забезпечують перерегулювання до 5% та скорочення часу перехідного процесу до 0.05 s. Результати досліджень можуть бути корисними при налагодженні перетворювачів та реалізації їх в мікропроцесорних системах.

Література

[1] Liserre, M.; Blaabjerg, F.; Hansen, S. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier. IEEE Trans. Ind. Appl. 2005, 41, 1281–1291.

[2] Three phase active rectifier (Front and converter). [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://youtu.be/Lh4shWrxlqI?si=KG0vBE72DfRk14z4

[3] Three phase Phase STATCUM for Reactive Power Compensation MATLAB Simuation Електронний ресурс].- Режим доступу: https://youtu.be/JForZkZgtbM?si=UfU84NpvsS8dQ5RM

MCIT Modeling, control & information technologies

Час безвідмовної роботи високонадійної напівмарківської системи двох ліфтів

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.094

Валентина Кушнір
Кафедра вищої математики
ННІ КІТІ НУВГП
Рівне, Україна
v.p.kushnir@nuwm.edu.ua

Олександр Кушнір
Рівне, Україна
kuchniroo@gmail.com

Анотація — **Наводяться кількісні оцінки швидкості збіжності функції розподілу напрацювання на відмову високонадійної системи двох ліфтів до показникової у припущенні, що інтервали робочого стану обох альтернувальних процесів мають показниковий розподіл. Також оцінюється гарантований час безвідмовної роботи цієї системи**

Ключові слова — альтернувальний процес відновлення, система двох ліфтів, теорема Реньї, напівмарківський процес, напрацювання на відмову

I. Вступ

В [1] наводяться рівномірні оцінки відхилення від функції показникового розподілу розв'язків інтегрального рівняння типу відновлення.

$$\Phi = \theta\, L + (1-\theta)\,\Phi \star K, \qquad (1)$$

де L, K — задані функції розподілу невід'ємних випадкових величин, $\theta \in (0;1)$, $\star$ — згортка функцій розподілу: $\Phi \star K(t) = \int_0^t \Phi(t-x)dK(x)$.

Ці оцінки можна використати при дослідженні характеристик надійності системи двох ліфтів (або дубльованої відновлюваної системи [2, с.73]). У статті [3] наводилася асимптотика функції розподілу часу безвідмовної роботи цієї системи у загальному випадку.

Метою даної роботи є кількісні оцінки цієї функції у випадку показникових розподілів проміжків роботи. Також оцінюється гарантований час безвідмовної роботи із заданою надійністю. В [4] розглянуто більш загальну систему, але в даній роботі оцінки уточнені саме для випадку N=2.

II. Основні умови та результати

A. Гарантований час безвідмовної роботи системи

Система двох ліфтів складається з двох незалежних альтернувальних процесів відновлення. Відмова системи наступає, коли обидва альтернувальні процеси перебувають у фазі відновлення.

У цій роботі вважаємо, що проміжки роботи мають показникові розподіли з параметрами u, v. Будемо позначати $m(F) = m_1(F)$, $m_2(F)$ — математичне сподівання та другий початковий момент відповідно випадкової величини з функцією розподілу $F(t)$.

Позначимо функції розподілу фаз відновлення B1 та B2 відповідно, показникову функцію розподілу $E_q(t) = 1 - e^{-qt}, t \ge 0$, $\beta_i(s) = \int_0^{+\infty} e^{-sx} dB_i(x)$, $i = 1,2$.

Назвемо t гарантованим часом безвідмовної роботи системи із надійністю γ, якщо ймовірність того, що система не відмовить до часу γ, є не меншою від γ.

Теорема 1. Нехай у початковий момент часу обидва альтернувальні процеси знаходяться в робочій фазі. Гарантований час безвідмовної роботи системи двох ліфтів із надійністю γ не менший від

$$\frac{1-\theta}{\theta(u+v)} \ln \frac{1-\theta}{\gamma + 2\theta\varkappa},$$

де $A_1(t) = \frac{1}{\beta_1'(v)} \int_0^t e^{-vx} dB_1(x)$,

$$A_2(t) = \frac{1}{\beta_2'(u)} \int_0^t e^{-ux} dB_2(x),$$

$$\theta_1 = 1 - \beta_1'(v),\ \theta_2 = 1 - \beta_2'(u),\ \theta = \frac{u}{u+v}\theta_1 + \frac{v}{u+v}\theta_2,$$

$$A(t) = \frac{u}{u+v}\frac{\beta_1'(v)}{1-\theta} A_1(t) + \frac{v}{u+v}\frac{\beta_2'(u)}{1-\theta} A_2(t),$$

$$m_j(A) = \frac{u}{u+v}\frac{\beta_1'(v)}{1-\theta} m_j(A_1) + \frac{v}{u+v}\frac{\beta_2'(u)}{1-\theta} m_j(A_2),$$

$$m_j(A_i) \le m_j(B_i),\ i,j = 1,2,\ K(t) = E_{u+v} \star A(t),$$

$$\varkappa = \frac{m_2(K)}{2m^2(K)} = \frac{\frac{2}{(u+v)^2} + \frac{2m(A)}{u+v} + m_2(A)}{2\left(\frac{1}{u+v} + m(A)\right)^2} \le$$

$$\le 1 + \frac{\left(m_2(A) - m^2(A)\right)(u+v)^2}{2}.$$

B. Оцінка функції розподілу часу безвідмовної роботи системи

Функцію розподілу часу безвідмовної роботи системи двох ліфтів позначатимемо $\Psi(t)$, якщо у початковий момент часу обидва альтернувальні процеси знаходяться в робочій фазі.

Теорема 2. Для функції розподілу часу безвідмовної роботи системи двох ліфтів при різних початкових умовах виконуються нерівності

$$\left|\Psi(t) - (1-\theta)E_q(t)\right| \le 2\theta\varkappa + \varepsilon,\ t \ge 0,$$

де $r = \frac{\theta}{1-\theta}$, $q = \frac{r}{m(K)} \leq r(u+v)$, $\varepsilon = \frac{u\theta_1}{v} + \frac{v\theta_2}{u}$.

III. Допоміжні твердження

Лема 1. Нехай *V(t)* — невід'ємна монотонна функція, *F(t)* — функція розподілу невід'ємної випадкової величини,

$$\theta = \int_0^{\infty} V(x)dF(x), \quad L(t) = \frac{1}{\theta}\int_0^t V(x)\,dF(x).$$

Тоді, якщо *V(t)* неспадна, то при всіх t>0 виконується нерівність $L(t) \leqslant F(t)$, а якщо *V(t)* незростаюча, то нерівність $L(t) \geqslant F(t)$.

Лема 2.

$$E_q * L(t) \geq E_q(t) - q\int_0^t \big(1 - L(x)\big)dx, t \geq 0.$$

Лема 3. (Нерівність Чебишова). Якщо *F(x)* — функція розподілу, функція *f(x)* неспадна, а *g(x)* незростаюча, то

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)g(x)dF(x) \leq$$
$$\leq \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dF(x) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} g(x)dF(x).$$

IV. Доведення

A. Доведення леми 1

Якщо *V(x)* — неспадна, то функція *F – L* зростає від 0, поки *V(x)* < θ, а потім спадає до 0 на нескінченності. Тому вона невід'ємна. Аналогічно розглядається випадок незростаючої *V(x)*.

B. Доведення леми 2

$$E_q * (1 - L)(t) = q\int_0^t \big(1 - L(t-x)\big)e^{-qx}dx \leq$$
$$\leq q\int_0^t \big(1 - L(t-x)\big)dx =$$
$$= q\int_0^t \big(1 - L(x)\big)dx.$$

C. Доведення леми 3

Для всіх дійсних *x* та *y*:

$$(f(x) - f(y))\,(g(x) - g(y)) \leqslant 0.$$

Тоді

$$\iint_{R^2} \big(f(x) - f(y)\big)\big(g(x) - g(y)\big)\,dF(x)dF(x) \leq 0.$$

Розкривши дужки та звівши подібні доданки, отримаємо твердження леми.

D. Доведення теореми 1

Якщо у початковий момент часу обидва альтернувальні процеси знаходяться в робочій фазі, то функція розподілу безвідмовної роботи системи двох ліфтів Ψ(t) є розв'язком рівняння (1) із

$$K(t) = E_{u+v} * A(t),$$
$$L(t) = E_{u+v} * \left(\frac{u}{u+v}\frac{\theta_1}{\theta}L_1(t) + \frac{v}{u+v}\frac{\theta_2}{\theta}L_2(t)\right),$$

де $L_1(t) = \frac{1}{\theta_1}\int_0^t ve^{-vx}\big(1 - B_1(x)\big)dx$,

$$L_2(t) = \frac{1}{\theta_{21}}\int_0^t ue^{-ux}\big(1 - B_2(x)\big)dx.$$

Позначимо Φ(*t*) розв'язок рівняння (1) із *L*(*t*)=*K*(t), для якого, згідно з [1, Теор. 2], виконуються рівномірні оцінки

$$|\Phi(t) - E_q(t)| \leq 2rx, t \geq 0. \qquad (2)$$

Функція Ψ(*t*) подається через Φ(*t*) формулою

$$\Psi(t) = L \star (\theta + (1 - \theta)\,\Phi(t)). \qquad (3)$$

З (2), (3) отримуємо

$$\Psi(t) \leq (1 - \theta)E_q(t) + \theta(1 + 2x). \qquad (4)$$

Якщо прирівняти праву частину цієї нерівності до 1-γ, то можна виразити гарантований час безвідмовної роботи (потім використовуємо нерівність $q \leqslant r(u+v)$). Нерівності $m_j(A_i) \leq m_j(B_i)$, *i, j* =1,2 випливають із того, що $A_i(t) \geq B_i(t)$ при всіх *t*>0, що, в свою чергу, отримується з леми 1.

E. Доведення теореми 2

Враховуючи лему 2, з (2), (3) отримуємо

$$\Psi(t) \geq L * \Big(\theta + (1 - \theta)\big(E_q(t) - 2rx\big)\Big) \geq$$
$$\geq \theta + (1 - \theta)\left(E_q(t) - qm(L)\right) - 2\theta x. \quad (5)$$

За лемою 3,

$$m(L_1) = \frac{1}{\theta_1}\int_0^{+\infty} x\big(1 - B_1(x)\big)dE_v(x) \leq$$
$$\leq \frac{1}{\theta_1}\int_0^{+\infty} xdE_v(x) \cdot \int_0^{+\infty} \big(1 - B_1(x)\big)dE_v(x) =$$
$$= \frac{1}{v}. \qquad (6)$$

Аналогічно $m(L_2) \leq \frac{1}{u}$. (7)

Із (6), (7) отримуємо

$$m(L) = m(E_{u+v}) + \frac{u}{u+v}\frac{\theta_1}{\theta}m(L_1) + \frac{v}{u+v}\frac{\theta_2}{\theta}m(L_2) \leq$$
$$\leq \frac{1}{u+v} + \frac{u}{u+v}\frac{\theta_1}{\theta}\frac{1}{v} + \frac{v}{u+v}\frac{\theta_2}{\theta}\frac{1}{u}. \qquad (8)$$

Підставивши (8) у (5), дістанемо

$$\Psi(t) \geq (1 - \theta)E_q(t) - \varepsilon - 2\theta x.$$

Перелік джерел посилання

[1] Карташов Н. В. "Неравенства в теореме Реньи". Теория вероятностей и математ. статистика. Том 45, 1991.С. 27–33 .

[2] Королюк В. С. "Стохастичні моделі систем": Навч. посібник. Київ: Либідь, 1993. — 136 с.

[3] Кушнір О.О. "Перша відмова високонадійної системи двох ліфтів". Теорія ймовірностей та математ. статистика. Том 59, 1998. С. 110 – 116.

[4] Кушнір О.О., Кушнір В.П. "Оцінки функції розподілу напрацювання на відмові високонадійної системи N-1 з N у випадку показникових розподілів інтервалів робочого стану усіх альтернувальних процесів". Кібернетика та системний аналіз. Том 60, № 3, 2024. С. 135 – 140.

Застосування спеціальних нейронних мереж у кібермататичному моделюванні

https://doi10.org/.31713/MCIT.2025.095

Захар Лістьєв
Кафедра комп`ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
z.c.listiev@nuwm.edu.ua

Анотація — **Розглянуто архітектури Physics-Informed Neural Networks, Graph Neural Networks та Neural Ordinary Differential Equations, що поєднують аналітичні та нейромережеві методи для розв'язання складних задач математичної фізики. Проведено огляд спеціалізованих нейронних мереж для вирішення математичних задач під час моделювання. Зроблено висновок про формування нової парадигми кібермататичного моделювання, заснованої на інтеграції математичних методів і методів мащинного навчання.**

Ключові слова — кібермататичне моделювання, Physics-Informed Neural Networks, Graph Neural Networks, Neural ODE, напівпровідникова електроніка, штучний інтелект.

I. Вступ

У сучасній науці та техніці математичне моделювання посідає центральне місце як універсальний інструмент дослідження складних систем і процесів. Зокрема, в галузях фізики, електроніки, матеріалознавства та суміжних дисциплін воно дає змогу отримувати кількісні оцінки, прогнозувати поведінку об'єктів та оптимізувати параметри технологічних процесів. Проте традиційні методи математичного моделювання, що ґрунтуються на чисельному розв'язанні диференціальних рівнянь або аналітичних підходах, часто стикаються з обмеженнями. Це стосується передусім задач, які характеризуються жорсткістю рівнянь, багатомасштабністю, наявністю граничних шарів та сильно нелінійними залежностями. У таких випадках зростає потреба у нових методологіях, здатних поєднати точність аналітичних підходів і гнучкість алгоритмів машинного навчання.

У цьому контексті виникає поняття кібермататичного моделювання, яке можна визначити як інтегративну парадигму, що поєднує класичні математичні методи із сучасними обчислювальними технологіями, зокрема з інструментами штучного інтелекту. В основі такого підходу лежить ідея злиття формальних моделей, що спираються на закони фізики та математики, із алгоритмами, які навчаються на даних та здатні апроксимувати функції високої складності. Особливе місце серед таких інструментів посідають спеціальні нейронні мережі, архітектурні властивості яких орієнтовані на роботу з диференціальними рівняннями, просторовими структурами та часовими рядами. До них належать, зокрема, Physics-Informed Neural Networks (PINN) [1], Graph Neural Networks (GNN) [2] та Neural Ordinary Differential Equations (NODE) [4], кожна з яких відкриває нові можливості для аналізу й прогнозування поведінки систем у тих випадках, де класичні підходи виявляються надто громіздкими або неефективними.

Використання таких штучних нейронних мереж дозволяє інтегрувати в процес навчання апріорні знання про фізичну природу явищ, що забезпечує не лише підвищення точності, а й стабільність моделі у випадках, коли кількість доступних експериментальних даних є обмеженою. Наприклад, PINN-моделі успішно застосовуються для моделювання теплопровідності, переносу заряду в напівпровідникових структурах та інших задач, де звичайні чисельні методи вимагають надмірних обчислювальних ресурсів. GNN виявляються ефективними у випадках, коли топологія досліджуваної системи має вирішальне значення, як-от у моделях взаємодії вузлів електронних схем або в задачах прогнозування властивостей кристалічних ґраток. NODE, у свою чергу, дозволяють описувати динаміку складних систем у неперервному часі, що відкриває нові перспективи для моделювання фізичних процесів на різних часових масштабах.

Таким чином, інтеграція спеціальних нейронних мереж у практику кібермататичного моделювання становить актуальний і перспективний напрям сучасних наукових досліджень. Вона сприяє не лише розширенню арсеналу методів для вивчення складних нелінійних систем, але й створює умови для побудови універсальних гібридних моделей, здатних поєднувати переваги аналітичних і обчислювальних підходів. Метою даної статті є аналіз властивостей спеціалізованих нейронних мереж та виявлення особливостей їх застосування у задачах кібермататичного моделювання.

II. Огляд літератури

Протягом останнього десятиліття відбулося стрімке зростання інтересу до застосування методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, у математичному моделюванні складних фізичних процесів. Однією з перших – стала поява так званих PINN [1], які вперше були систематизовано описані

в роботах Р. Раїссі та Дж. Карніадакіса (Raissi, Perdikaris, Karniadakis, 2019). Основна ідея PINN полягає у включенні фізичних законів, представлених у вигляді диференціальних рівнянь, безпосередньо у функцію втрат нейронної мережі. Схему архітектури PINN, де показано вхідні змінні, вихід u, обчислення похідних через автоматичне диференціювання та внесок у функцію втрат показано на рис. 1. Це дає змогу моделі не лише навчатися на обмежених експериментальних даних, але й задовольняти фундаментальні співвідношення, що описують поведінку системи. Подібний підхід значно розширює можливості застосування нейронних мереж у випадках, де традиційні чисельні методи, наприклад метод скінченних елементів, є надто обчислювально затратними. Зокрема, PINN продемонстрували ефективність у задачах моделювання теплопровідності, динаміки рідин та розподілу заряду в напівпровідникових структурах.

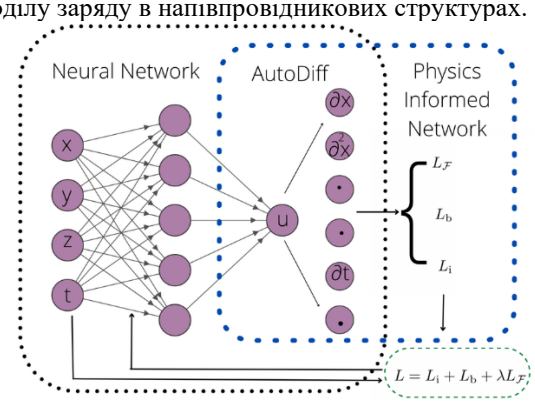


Рис. 1. Схема архітектури PINN

Інший важливий напрям становлять GNN [2], які спочатку були розроблені для аналізу даних у вигляді графів (Scarselli et al., 2009; Bronstein et al., 2017). Особливістю GNN є їхня здатність враховувати топологічні зв'язки між елементами системи, що робить їх надзвичайно перспективними для моделювання структурованих об'єктів у фізиці та матеріалознавстві. Наприклад, у задачах прогнозування електронних властивостей кристалів або вивчення взаємодій у складних електронних схемах графові нейронні мережі здатні відображати взаємозалежності між вузлами та ребрами, що не завжди можливо у класичних підходах. Низка сучасних робіт демонструє застосування GNN у моделюванні енергетичних станів атомних ґраток та для прискореного розрахунку матеріальних констант, що особливо важливо в контексті розвитку нових напівпровідникових технологій.

Не менш перспективним напрямом є використання Neural ODE [4], концепція яких була запропонована у роботах Чена та співавторів (Chen et al., 2018). У цьому підході динаміка прихованих станів нейронної мережі описується безперервними диференціальними рівняннями, що дає змогу більш природно відображати часову еволюцію системи. Neural ODE продемонстрували значний потенціал у моделюванні динамічних процесів, таких як перенесення носіїв заряду, розповсюдження хвильових сигналів або нелінійні коливальні явища. Перевага цього підходу полягає у можливості інтеграції з класичними чисельними методами розв'язання ОДР, що формує підґрунтя для створення гібридних алгоритмів кіберматематичного моделювання.

Слід також відзначити дослідження, спрямовані на інтеграцію вищезгаданих підходів у єдині архітектури. Зокрема, розробляються PINN-моделі з використанням графових структур, які дозволяють моделювати багатовимірні задачі з урахуванням складної геометрії. Паралельно проводяться роботи щодо поєднання Neural ODE із глибинними рекурентними мережами, що відкриває нові можливості для моделювання складних динамічних систем у реальному часі. У сучасній літературі такі гібридні підходи часто розглядаються як ключ до побудови універсальних кіберматематичних моделей, які можуть поєднувати точність класичних методів і адаптивність нейронних мереж.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про формування нової наукової парадигми, у якій спеціальні нейронні мережі стають не лише допоміжним інструментом обробки даних, а й повноцінним елементом методології математичного моделювання. Їх застосування в задачах електроніки, фізики матеріалів і суміжних галузях відкриває перспективи для розв'язання раніше недосяжних проблем, пов'язаних із багатомасштабністю, нелінійністю та обмеженістю емпіричних даних.

III. Методи та підходи застосування спеціальних нейронних мереж

Кіберматематичне моделювання складних фізичних систем, зокрема у сфері напівпровідникової електроніки, вимагає поєднання класичних методів розв'язання диференціальних рівнянь із сучасними інструментами штучного інтелекту. На відміну від традиційних чисельних методів, таких як метод скінченних різниць чи скінченних елементів [5, 6], спеціальні нейронні мережі здатні інтегрувати апріорні знання про закони фізики безпосередньо у процес навчання, що відкриває нові перспективи у створенні універсальних гібридних моделей.

Одним із найбільш розроблених напрямів є PINN [1]. За рахунок того, що рівняння, які складають основу моделі, включені у функцію втрат нейронної мережі вдається задовольняти рівняння у часткових похідних не лише для значень навчальних даних, а й у всій області визначення задачі. Наприклад, у задачі моделювання розподілу електричного потенціалу в p-n переході можна задати рівняння Пуассона як обмеження у функції втрат, що суттєво зменшує кількість необхідних експериментальних даних [7]. У порівнянні з класичними чисельними алгоритмами, PINN демонструють кращу масштабованість для високовимірних задач і дають змогу отримувати рішення там, де пряме застосування методу

скінченних елементів вимагає надмірних обчислювальних ресурсів.

Інший перспективний підхід пов'язаний з використанням Graph Neural Networks (GNN) [2, 3]. На відміну від класичних багатошарових перцептронів, ці мережі враховують топологічну структуру даних, що робить їх надзвичайно ефективними для моделювання фізичних систем, де взаємодія між елементами має вирішальне значення. У випадку електронних схем чи кристалічних ґраток вузли графа відповідають атомам чи електронним елементам, а ребра — зв'язкам або взаємодіям між ними. Схему архітектури GNN зображено на рис. 2. Застосування GNN у матеріалознавстві дозволило значно прискорити прогнозування енергетичних рівнів кристалів, що підтверджується сучасними дослідженнями у галузі «geometric deep learning» [3].

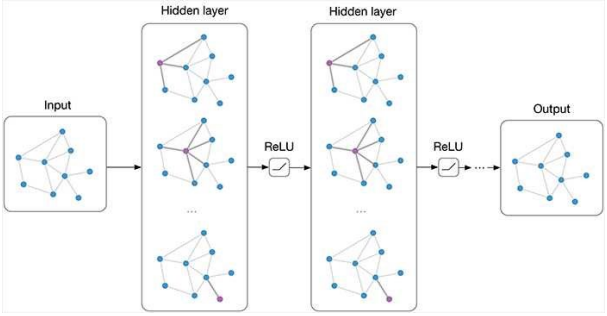


Рис 2. Схема архітектури Graph Neural Networks (GNN)

Третім важливим напрямом є Neural Ordinary Differential Equations (Neural ODE) [4]. У цьому підході приховані стани нейронної мережі розвиваються відповідно до системи диференціальних рівнянь, інтегрованих чисельно. На відміну від рекурентних мереж, де дискретний крок часу задається жорстко, Neural ODE забезпечують безперервну часову динаміку. Це робить їх придатними для моделювання процесів, що описуються нелінійними динамічними рівняннями, зокрема переносу носіїв заряду чи хвильових процесів у напівпровідникових структурах [9]. У комбінації з PINN такі моделі формують основу для побудови гібридних архітектур, що поєднують точність аналітичних підходів із гнучкістю глибинного навчання.

У сучасній літературі також активно досліджуються комбіновані методи. Наприклад, поєднання PINN та GNN дозволяє ефективно моделювати багатовимірні задачі з урахуванням складної геометрії, а інтеграція Neural ODE з рекурентними мережами відкриває нові перспективи для прогнозування процесів у реальному часі [1, 4]. Важливим напрямом розвитку вважається й оптимізація архітектур, оскільки висока обчислювальна складність і чутливість до вибору гіперпараметрів залишаються ключовими викликами [8].

Таким чином, методи PINN, GNN та Neural ODE формують три головні підходи у застосуванні спеціальних нейронних мереж для кібератематичного моделювання. Кожен з них має власні переваги та обмеження: PINN забезпечують фізично узгоджені розв'язки, GNN ефективні у випадках складної топології, а Neural ODE відтворюють часову динаміку систем. Їх синергія створює підґрунтя для розвитку нової наукової парадигми, у межах якої класичні математичні моделі й алгоритми глибинного навчання виступають не конкурентами, а взаємодоповнюючими інструментами.

IV. Приклади застосування

Застосування спеціальних нейронних мереж у кібератематичному моделюванні знаходить підтвердження у низці практичних досліджень, які демонструють ефективність цих методів у задачах, де класичні підходи стикаються з суттєвими обмеженнями. Найбільш поширеним напрямом є використання PINN у задачах розв'язання рівнянь у часткових похідних, що описують фізичні процеси. Наприклад, у роботах Raissi та співавторів [1] PINN успішно застосовано для моделювання теплопровідності та хвильових рівнянь, що дозволило зменшити потребу у чисельних сітках високої розмірності.

Подальші дослідження, такі як робота Cao та ін. (A Physics-Informed Neural Networks Algorithm for Simulating Semiconductor Devices, 2023), показали можливість інтеграції рівнянь Пуассона та неперервності безпосередньо у функцію втрат нейронної мережі. Це забезпечило отримання фізично узгоджених розв'язків при моделюванні p–i–n структур навіть за відсутності повних експериментальних даних. Liu та співавт. (2024) розвинули цей підхід, запропонувавши Asymptotic-Preserving Neural Networks, здатні враховувати асимптотичні переходи між різними фізичними режимами — від балансового до дифузійного, — що є важливим для точного опису електронного транспорту у напівпровідникових приладах. Подібні методи успішно використовуються для аналізу теплових процесів у мікроелектроніці [5, 7], а також для задач багатомасштабного моделювання рівняння Больцмана [Liu et al., Journal of Computational Physics, 2024].

Іншим напрямом практичного застосування є Graph Neural Networks (GNN), які продемонстрували високу ефективність у задачах, пов'язаних з аналізом складних структурованих систем. У матеріалознавстві GNN використовуються для прогнозування електронних властивостей кристалічних ґраток та вивчення енергетичних станів атомних структур [2, 3]. Наприклад, Hestroffer та співавт. (Graph Neural Networks for Efficient Learning of Mechanical Properties of Polycrystalline Materials, 2022) продемонстрували, що GNN можуть точно передбачати механічні властивості полі-кристалічних матеріалів, моделюючи вплив мікроструктури на макроскопічну поведінку. Gong та Ruff (2023) у своїх роботах показали можливість використання GNN для виявлення закономірностей у періодичних структурах матеріалів і передбачення

параметрів, таких як енергія формування, електронна спорідненість та стабільність кристалічної решітки.

У сучасних дослідженнях з розробки нових напівпровідникових матеріалів GNN допомагають передбачати дефекти кристалічної структури та їхній вплив на електронну провідність, що значно скорочує витрати на експериментальні випробування. У галузі електронних схем подібні мережі застосовуються для аналізу топологій складних мережевих структур, оптимізації трасування сигналів і виявлення аномалій у схемах, де традиційні методи графової оптимізації виявляються неефективними.

Третім важливим прикладом є використання Neural ODE у задачах моделювання часової динаміки процесів. У фізиці та електроніці ці моделі застосовуються для опису коливальних процесів, нелінійних хвильових явищ і транспорту заряду у мікроелектронних структурах [4, 9]. Завдяки можливості опису безперервної часової динаміки, Neural ODE забезпечують більш природне моделювання фізичних процесів, уникаючи помилок, пов'язаних із дискретизацією часу. Дослідження Chen та співавт. (Neural ODE, 2018) започаткувало нову парадигму, яка поєднує глибинне навчання з теорією диференціальних рівнянь. Сьогодні цей підхід часто комбінують із PINN для побудови гібридних моделей, здатних враховувати як часову, так і просторову динаміку систем.

Варто підкреслити, що застосування спеціальних нейронних мереж не обмежується лише фізикою чи електронікою. У літературі описано приклади використання PINN для прогнозування біомедичних процесів, зокрема моделювання кровотоку у судинних системах, а GNN — для аналізу молекулярних взаємодій у хімії та фармацевтиці [1, 3]. Це підтверджує універсальність таких методів і їх потенціал у створенні міждисциплінарних кібератематичних моделей.

V. Висновки

Проведений аналіз показав, що сучасні підходи, зокрема PINN, GNN та Neural ODE, суттєво розширюють можливості традиційних методів математичного моделювання у фізиці та електроніці. Їх ключовою перевагою є здатність інтегрувати фізичні закони у процес навчання, відтворювати складні топологічні залежності та забезпечувати опис часової динаміки систем у безперервному просторі.

Порівняння із класичними методами, такими як метод скінченних елементів чи підходи теорії збурень [5-7], продемонструвало, що спеціальні нейронні мережі дозволяють зменшити обчислювальну складність у багатовимірних задачах, забезпечують вищу стійкість до обмежених даних і створюють умови для отримання фізично узгоджених результатів навіть у випадках недостатності емпіричної інформації. Приклади застосування [1-4, 9] підтверджують їх ефективність у моделюванні розподілу носіїв заряду, прогнозуванні електронних властивостей матеріалів, аналізі коливальних процесів і складних структурних систем.

Разом із тим, слід відзначити наявність певних обмежень, серед яких — висока обчислювальна вартість навчання, чутливість до вибору архітектури та гіперпараметрів, а також складність інтерпретації результатів [8]. Ці фактори визначають необхідність подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію нейромережевих архітектур, розробку ефективних алгоритмів регуляризації та створення гібридних методологій, які поєднують класичні аналітичні моделі з алгоритмами глибинного навчання.

Таким чином, застосування спеціальних нейронних мереж у кібератематичному моделюванні можна розглядати як формування нової наукової парадигми, у межах якої класичні та інтелектуальні методи виступають взаємодоповнюючими складовими єдиної інтегрованої системи. Подальший розвиток цього напряму матиме суттєве значення для розв'язання задач у напівпровідниковій електроніці, матеріалознавстві та інших високотехнологічних галузях, де критично важливим є поєднання точності, адаптивності та ефективності.

Посилання

[1] Raissi M. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations / M. Raissi, P. Perdikaris, G. E. Karniadakis // *Journal of Computational Physics.* – 2019. – v.378. – P. 686–707.

[2] Scarselli F. The graph neural network model / F. Scarselli, M. Gori, A. C. Tsoi, M. Hagenbuchner, G. Monfardini // *IEEE Transactions on Neural Networks.* – 2009. – v.20. – № 1. – P. 61–80.

[3] Bronstein M. M. Geometric deep learning: Going beyond Euclidean data / M. M. Bronstein, J. Bruna, Y. LeCun, A. Szlam, P. Vandergheynst // *IEEE Signal Processing Magazine.* – 2017. – v.34. – № 4. – P. 18–42.

[4] Chen R. T. Q. Neural ordinary differential equations / R. T. Q. Chen, Y. Rubanova, J. Bettencourt, D. Duvenaud // *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS).* – 2018. – v.31. – P. 6572–6583.

[5] Selberherr S. Analysis and Simulation of Semiconductor Devices / S. Selberherr. – Wien–New York: Springer-Verlag, 1984. – 296 p.

[6] Markowich P. A. Semiconductor Equations / P. A. Markowich, C. A. Ringhofer, C. Schmeiser. – Wien–New York: Springer-Verlag, 1990. – 248 p.

[7] Jerome J. W. Analysis of Charge Transport: A Mathematical Study of Semiconductor Devices / J. W. Jerome. – New York: Springer-Verlag, 1996. – 167 p.

[8] Grasser T. Bias Temperature Instability for Devices and Circuits / T. Grasser. – New York: Springer-Verlag, 2014. – 812 p.

[9] Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices (4th ed.) / S. M. Sze, Y. Li. – Hoboken, NJ: Wiley, 2021. – 94

Оцінка ресурсу трубопроводів зі зварними з'єднаннями у водневому середовищі

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.096

Богдан Маркович
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
bohdan.m.markovych@lpnu.ua

Богдана Гайвась
Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача
Національна академія наук України
Львів, Україна
bogdana.gayvas@gmail.com

Анатолій Дмитрук
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
anatolii.a.dmytruk@lpnu.ua

Вероніка Дмитрук
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
dmytruk15@gmail.com

Анотація— **Запропоновано інтегрований метод прогнозування ресурсу магістральних трубопроводів зі сталей Х60–Х80 у зонах зварного з'єднання з урахуванням впливу водню. Метод поєднує часові моделі зародження та росту тріщини з перевіркою експлуатаційної придатності за віртуальною діаграмою оцінювання придатності. На основі аналітичних виразів визначено час зародження та розвитку тріщини в базових умовах і за наявності водню. Введено ефективні параметри тріщиностійкості та порогу росту, що відображають деградацію властивостей сталі та вплив залишкових напружень у зоні зварного шва. Проведено числовий експеримент, який показав суттєве скорочення ресурсу труби у водневому середовищі. Застосування віртуальної діаграми оцінювання придатності підтвердило необхідність урахування додаткових коефіцієнтів безпеки для зварних з'єднань. Отримані результати мають практичне значення для підвищення надійності трубопровідних систем і планування інтервалів технічної діагностики.**

Ключові слова— математичне моделювання; зварне з'єднання; ресурс трубопроводу; воднева крихкість; часові моделі росту тріщини; віртуальна діаграма оцінювання придатності

I. Вступ

Магістральні нафтогазові трубопроводи працюють у складних корозійно-механічних умовах, де зародження та ріст тріщин визначають реальний ресурс труб і інтервали технічного обслуговування [1, 2]. Під тріщиною розуміють локальне руйнування матеріалу у вигляді вузької порожнини, яка може виникати на внутрішній або зовнішній поверхні стінки труби. Особливо небезпечними є тріщини, що розвиваються у зонах зварних з'єднань: зварний метал (ЗМ) - металева ділянка, що безпосередньо утворюється під час зварювання; зона термічного впливу (ЗТВ) - ділянка, прилегла до зварного шва, де температура під час зварювання призводить до зміни мікроструктури та механічних властивостей сталі; основний метал (ОМ) - незмінена зона труби поза впливом зварювання.

Класичні підходи до оцінювання ресурсу спираються на часові моделі зародження та подальшого розвитку тріщини або еквівалентні залежності для швидкості її росту [3]. Такі моделі враховують режим потоку (ламінарний чи турбулентний), геометрію дефекту та механічні характеристики сталі, що дозволяє оцінювати інтервали діагностики й ремонту безпосередньо у часових одиницях.

Водночас, перехід до воднево-орієнтованих сервісних умов висуває додаткові вимоги до надійності. Відомо, що найбільшу небезпеку становить явище водневої крихкості металів, коли атомарний водень, проникаючи в кристалічну ґратку сталі, акумулюється біля дефектів структури - дислокацій, міжзернових меж, порожнин. Це призводить до різкого зниження пластичності та ударної в'язкості матеріалу і робить труби вразливими навіть до відносно невеликих навантажень. В умовах дії циклічних навантажень водень знижує поріг витривалості, прискорює зародження та розвиток мікротріщин, а також сприяє швидкому росту існуючих дефектів. Біля вершин тріщин, де концентруються максимальні розтягувальні напруження, локальне збагачення воднем суттєво зменшує опір поширенню руйнування, що призводить до воднево-індукованого розтріскування [1].

Зварні з'єднання, а особливо ЗТВ, є найуразливішими ділянками для впливу водню через мікроструктурну неоднорідність і залишкові напруження [2]. У цих умовах стандартні діаграми оцінювання придатності (ДОП) можуть бути неконсервативними для зварних з'єднань, тому потребують уточнення з урахуванням впливу водню та локальних властивостей [4].

Отже, постає практично важливе завдання - поєднати часово орієнтовані моделі ресурсу труб із перевіркою їхньої експлуатаційної придатності в термінах ДОП, з урахуванням водневої крихкості та неоднорідності зварних з'єднань. Така інтеграція має:

(i) забезпечити інженерну простоту інтегральних розрахунків часу зародження та подальшого розвитку тріщини;

(ii) коректно врахувати локальні ефекти і залишкові напруження;

(iii) забезпечити консервативність оцінки через віртуальну діаграму оцінювання придатності (ВДОП), модифіковану діаграму оцінювання придатності, яка базується на статистичній симуляції множини сценаріїв руйнування, запропоновану Wijnen, Parker, Gagliano, Martínez-Pañeda.

Мета роботи полягає у створенні інтегрованої методики для прогнозування ресурсу трубопроводів зі сталей X60-X80 у зоні ЗМ, що враховує водневу деградацію матеріалу та перевіряє експлуатаційну придатність за ВДОП.

II. Методологічні основи оцінювання ресурсу сталевих трубопроводів

Класичний підхід до оцінювання довговічності магістральних труб спирається на поділ ресурсу на період зародження тріщини t_a та період її розвитку t_{growth} з інтегруванням швидкості її поширення $V(\Delta K)$.

У роботі [5] наведено узагальнені аналітичні формули для t_a, t_{growth} і $t_p = t_a + t_{growth}$ із урахуванням режиму потоку, коефіцієнта інтенсивності напружень, геометрії дефекту, а також емпіричних корекцій середовища для сталей X60–X80 [6, 7, 8, 9].

Закон росту тріщини задається в рамках функції $\varphi(\Delta K)$, що узгоджується зі стандартним парисівським описом втомного росту тріщин [10]. Такий підхід зручний для планування інтервалів діагностики/ремонту, оскільки дає часові оцінки.

У практиці інженерного аналізу дефектів широко використовують ДОП, яка порівнює відносні навантаження L_r і відносну тріщиностійкість K_r з допустимою кривою. Рекомендації та процедури для побудови/застосування ДОП регламентуються стандартами BS 7910:2019 (оцінка дефектів у металевих конструкціях) та API 579-1/ASME FFS-1:2021 (оцінка придатності до експлуатації обладнання). Ці документи забезпечують практичну базу для швидкої перевірки «безпечно/небезпечно», але здебільшого виходять із гомогенних властивостей матеріалу і не описують часову еволюцію $a(t)$, що критично для планування ресурсу.

Водень знижує в'язкість руйнування K_{Ic}, поріг втомного росту ΔK_{th} і пластичність сталей; найуразливішими є зони зварних з'єднань: метал шва (ЗМ) і ЗТВ.

Мікроструктурна неоднорідність (частка беніту/фериту), градієнти твердості та залишкові напруження сильно впливають на локальний опір руйнуванню. У таких умовах застосування стандартних ДОП без додаткових поправок може давати неконсервативні оцінки придатності.

Сучасні роботи пропонують ВДОП - діаграми, що будуються на основі фізично обґрунтованого моделювання з урахуванням локальних властивостей для ОМ/ЗМ/ЗТВ. Зокрема, [4] показали, що для однорідного металу в нейтральному середовищі ВДОП узгоджуються зі стандартними ДОП, тоді як для зварних з'єднань у водневому середовищі стандартні діаграми ДОП можуть бути занадто оптимістичними, тому потрібні додаткові коефіцієнти безпеки і локалізовані параметри $K_{Ic}^{\text{eff}}(C_H, zone)$, $\Delta K_{th}^{\text{eff}}(C_H, zone)$.

Наявні часові моделі ресурсу труб (див. [6, 7, 8, 9]) зазвичай використовують гомогенізовані характеристики та не враховують явної залежності від C_H і зони зварного з'єднання; з іншого боку, ВДОП [4] дають моментальну перевірку придатності в координатах (L_r, K_r), але не надають безпосередньо часових оцінок t_a, t_{growth}, t_p.

Це мотивує до створення інтегрованої схеми, у якій локальні ефективні параметри - коефіцієнт тріщиностійкості K_{Ic}^{eff}, пороговий діапазон коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{th}^{eff} та, за потреби, залишкове напруження σ_{res} враховуються у часових інтегралах. Отримані результати перевіряються за ВДОП із застосуванням рекомендованих коефіцієнтів безпеки.

III. Постановка задачі

Розглядається відрізок прямолінійної труби зі сталі X60, діаметром D і товщиною стінки δ, яка експлуатується під дією внутрішнього тиску $p(t)$ у циклічному (маневровому) режимі. На внутрішній поверхні в зоні термічного впливу ЗМ (ЗТВ) розташований подовжній поверхневий дефект початкової глибини a_0.

Задача полягає в оцінюванні ресурсу труби до досягнення критичної глибини тріщини a_{crit} з урахуванням впливу водню на локальні характеристики тріщиностійкості.

Основні завдання - отримати узгоджену процедуру оцінювання ресурсу труби зі сталі X60 з внутрішнім поверхневим дефектом у ЗТВ при циклічному тиску, з урахуванням впливу водню. Метод складається з чотирьох зв'язаних кроків: (i) розрахунок часових інтегралів зародження та росту

тріщин за методикою [5]; (ii) локалізація параметрів для ЗТВ та водню; (iii) визначення критичної точки та повний ресурс; (iv) перевірка ВДОП і, за потреби, консервативна корекція [4].

IV. Методика прогнозування ресурсу

Для тонкостінного циліндра тангенціальне (колове) напруження визначається за формулою

$$\sigma = \frac{pD}{2\delta}, \qquad \Delta\sigma = \frac{(p_{\max} - p_{\min})D}{2\delta}. \tag{1}$$

Для внутрішнього подовжнього поверхневого дефекту маємо

$$K_I(a) = \sigma\sqrt{\pi a}\, Y\left(\frac{a}{\delta}\right), \Delta K(a) = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}\, Y\left(\frac{a}{\delta}\right). \tag{2}$$

Тут $Y(\cdot)$ - геометричний коефіцієнт; у межах відносно короткого ініціаційного інтервалу допускаємо консервативну апроксимацію $Y \approx Y_0$ (для аналітичних інтегралів), а при потребі уточнюємо $Y(a/\delta)$ чисельно [6].

Використовуючи узагальнену модель $\varphi(\Delta K)$ для швидкості росту тріщини [6, 7], що сумісна з законом Паріса–Ердогана [10], отримаємо:

$$\frac{da}{dN} = C[\Delta K(a)]^m,$$

$$\frac{da}{dN} = C\left(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0\right)^m a^{m/2}, \quad (if\ Y \approx Y_0), \tag{3}$$

де C, m - експериментально визначені матеріальні константи, що характеризують кінетику росту тріщин в сталі залежно від виду та характеристик середовища.

Кінець ініціації визначаємо пороговою умовою

$$\Delta K(a_{tr}) = \Delta K_{th}\ ,\ a_{tr} = \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0}\right)^2. \tag{4}$$

Тоді кількість циклів ініціації та час:

$$N_a = \int_{a_0}^{a_{tr}} \frac{da}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^m a^{m/2}} = \frac{a_{tr}^{1-\frac{m}{2}} - a_0^{1-\frac{m}{2}}}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^m\left(1-\frac{m}{2}\right)},$$

$$t_a = \frac{N_a}{n}, \tag{5}$$

де n - середня річна кількість циклів навантаження у режимі експлуатації [8, 9]. Для стадії росту тріщини до критичного стану інтегруємо:

$$N_{growth} = \int_{a_{tr}}^{a_{crit}} \frac{da}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^m a^{m/2}} = \frac{a_{crit}^{1-\frac{m}{2}} - a_{tr}^{1-\frac{m}{2}}}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^m\left(1-\frac{m}{2}\right)},$$

$$t_{growth} = \frac{N_{growth}}{n}. \tag{6}$$

Критичний розмір визначаємо за LEFM або геометричним обмеженням:

$$a_{crit}^{(K)} = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma\sqrt{\pi}Y_0}\right)^2, \quad a_{crit} = \min\{a_{crit}^{(K)}, \delta\},$$

$$t_p = t_a + t_{growth}. \tag{7}$$

З огляду на неоднорідність зварного з'єднання та водневу крихкість [4], замінюємо матеріальні параметри на ефективні локальні:

$$K_{Ic} \to K_{Ic}^{eff}(C_H, \text{zone}), \quad \Delta K_{th} \to \Delta K_{th}^{eff}(C_H, \text{zone}), \tag{8}$$

а кінетичні коефіцієнти - на (C_H, m_H) . Для амплітудно зумовленого росту зберігаємо форму:

$$\Delta K^{eff}(a) = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}\, Y\left(\frac{a}{\delta}\right), \tag{9}$$

а залишкові напруження σ_{res} враховуємо в оцінці K_I^{eff} (середній рівень) і, головне, у деградації K_{Ic} та порозі ΔK_{th} :

$$K_I^{eff}(a) = \left(\sigma + \sigma_{res}\right)\sqrt{\pi a}\, Y\left(\frac{a}{\delta}\right). \tag{10}$$

Тоді:

$$a_{tr}^{(H)} = \left(\frac{\Delta K_{th}^{eff}}{\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0}\right)^2,$$

$$N_a^{(H)} = \int_{a_0}^{a_{tr}^{(H)}} \frac{da}{C_H(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^{m_H} a^{m_H/2}},$$

$$N_{growth}^{(H)} = \int_{a_{tr}^{(H)}}^{a_{crit}^{(H)}} \frac{da}{C_H(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^{m_H} a^{m_H/2}},$$

$$a_{crit}^{(H)} = \min\left\{\left(\frac{K_{Ic}^{eff}}{\sigma\sqrt{\pi}Y_0}\right)^2, \delta\right\},$$

$$t_p^{(H)} = \frac{N_a^{(H)} + N_{growth}^{(H)}}{n}. \tag{11}$$

Для валідації експлуатаційної придатності визначаємо

$$L_r = \frac{\sigma}{\sigma_{flow}}, \qquad K_r = \frac{K_I^{eff}}{K_{Ic}^{eff}}, \tag{12}$$

та перевіряємо розташування робочої точки відносно ВДОП для відповідної зони (ОМ/ЗМ/ЗТВ)

і рівня C_H. Якщо точка наближена до граничної кривої, вводимо додатковий коефіцієнт безпеки $\gamma_F \in [1.3,1.6]$ до часових оцінок:

$$t_{p,\text{cons}}^{(H)} = \frac{t_p^{(H)}}{\gamma_F}. \qquad (13)$$

Далі розглянемо результати числових досліджень.

V. Числовий експеримент

Для демонстрації застосовності методу виконано обчислення для труби зі сталі X60 з параметрами, характерними для магістральних водневих трубопроводів.

ТАБЛИЦЯ 1. Вхідні параметри

Параметр	Baseline (повітря)	HAZ+H (водень)
Діаметр D, мм	530	530
Товщина δ, мм	12	12
Початкова тріщина a_0, мм	3	3
$p_{\max}$, $p_{\min}$, МПа	7; 5	7; 5
Амплітуда тиску Δp, МПа	2	2
Окружне напруження σ, МПа	$\frac{pD}{2\delta} \approx 154.6$	те ж
Геометр. коеф. Y_0	1.1	1.1
Коеф. Паріса C	$5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Показник m	3	3
Поріг ΔK_{th}, МПа$\sqrt{\text{м}}$	6	2
K_{Ic}^{eff}, МПа$\sqrt{\text{м}}$	50	30
Кількість циклів/рік n	10^4	10^4

На рис. 1 показано еволюцію глибини тріщини $a(N)$ для двох сценаріїв: повітря та водень. Для обох випадків використано однакові геометричні параметри та навантаження, а відмінність зумовлена лише параметрами середовища ($C, m, \Delta K_{th}$ проти $C_H, m_H, \Delta K_{th}^{eff}$).

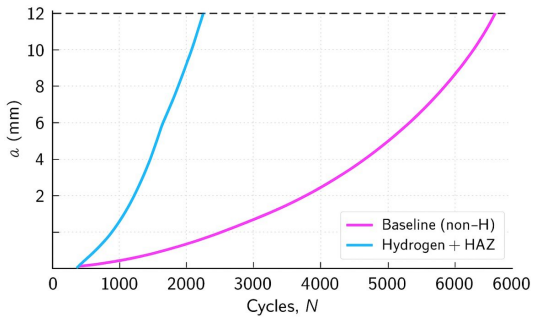


Рисунок 1. Зростання глибини тріщини a зі збільшенням кількості циклів N для сталевої труби X60 (базовий vs водневий випадки). Пунктирною лінією позначено граничну товщину стінки $a_{crit} = \delta$.

За описаних навантажень за нейтральних умов експлуатації сталевої труби існує помітний ініціаційний інтервал ($t_a \sim 2.5$ роки), після чого ріст тріщин прискорюється, і загальний ресурс труби становить ~ 5.7 років. У випадку з воднем з дефектом у ЗТВ поріг ΔK_{th}^{eff} низький, тому ініціація фактично відсутня, і процес відразу входить у режим росту тріщин; ресурс труби зменшується до ~ 1.7 року. Корекція за допомогою ВДОП забезпечує консервативність оцінки ресурсу для зварних з'єднань у водні.

Висновки

Для труби зі сталі X60 із дефектом у ЗТВ, отримано повний ресурс за прийнятих параметрів циклічного навантаження для базового (повітря) і водневого випадків. Результати показали, що в умовах наявності водню та зварної зони повний ресурс труби скорочується майже у 4 рази і при цьому стадія ініціації практично зникає. Перевірка робочої точки на ВДОП показала, що без врахування додаткового запасу оцінка може бути неконсервативною. Введення коефіцієнта безпеки $\gamma_F = 1.3 - 1.6$ зменшує розрахунковий ресурс до 0.9-1.1 року, що відповідає практичним вимогам безпеки для трубопроводів у водневому середовищі. Новизна підходу полягає у поєднанні часово орієнтованої методики з валідацією через ВДОП. Такий гібридний підхід дозволяє одержати консервативні оцінки ресурсу для зварних труб у водневому середовищі. Практичні наслідки показали, що зниження амплітуди коливань тиску Δp та контроль вмісту водню у середовищі здатні суттєво збільшити ресурс, а особлива увага має бути приділена ЗТВ зварних з'єднань, де деградаційні ефекти проявляються найсильніше.

References

[1] S. P. Lynch, "Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms," Corrosion Reviews, vol. 30, no. 3–4, pp. 105–123, 2012. doi:10.1515/corrrev-2012-0502.

[2] R. P. Gangloff, "Hydrogen-assisted cracking of high-strength alloys," in Stress corrosion cracking, R. H. Jones, Ed. ASM International, pp. 127–162, 2003.

[3] A. R. Troiano, "The role of hydrogen and other interstitials in the mechanical behavior of metals," Metallurgical Transactions, vol. 52, pp. 54–76, 1960.

[4] J. Wijnen, J. Parker, M. Gagliano, and E. Martínez-Pañeda, "Virtual failure assessment diagrams for hydrogen transmission pipelines," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 149, p. 149984, 2025. doi:10.1016/j.ijhydene.2025.149984.

[5] O. Ye. Andrejkiv and I. Ya. Dolinska, Prohnozuvannia zalyshkovoho resursu trub naftohazoprovodiv z urakhuvanniam umov ekspluatatsii i dehradatsii yikh materialiv. Kyiv: Naukovo-vyrobnyche pidpryiemstvo "Naukova Dumka" NAN Ukrainy, 2023, 268 p. ISBN 978-966-00-1852-5. doi:10.15407/978-966-00-1852-5.

[6] A. I. Raichenko, Matematychna teoriia dyfuzii u zastosuvanniakh. Kyiv: Naukova Dumka, 1981, 396 p.

[7] W. Y. Choo, I. Y. Lee, C. G. Cho, and S. H. Hwang, "Hydrogen solubility in pure iron and effects of alloying elements on the solubility in the temperature range 20 to 500 °C," Journal of Materials Science, vol. 16, no. 5, pp. 1285–1292, 1981.

[8] O. Andrejkiv, O. Hembara, and I. Dolinska, "Prediction of residual service life of pipeline under non-stationary oil flow taking into account steel degradation," in G. Bolzon and G. Gabetta (Eds.), Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems, Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 102. Cham: Springer, pp. 203–216, 2021.

[9] O. Tsyhulnyk, Z. Slobodyan, M. Hrebel "Elektrokhimichni pokaznyky ekspluatatsiinoi prydatnosti naftohazoprovodiv," Fizyko-khimichna mekhanika materialiv, Spec. issue no. 5, pp. 284–289, 2006.

[10] P. C. Paris and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws," Journal of Basic Engineering, vol. 85, no. 4, pp. 528–533, 1963. doi:10.1115/1.3656900.

Про вплив сорбції хімічних речовин на процес нелінійної фільтраційної консолідації пористого середовища з геобар'єром

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.097

Ольга Мічута
Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна
o.r.michuta@nuwm.edu.ua

Петро Мартинюк
Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна
p.m.martyniuk@nuwm.edu.ua

Анотація – у роботі розглянуто особливості функціонування геобар'єрів — інженерних штучних тонких включень, створених на основі глинистих та геосинтетичних матеріалів, які застосовуються у полігонах твердих побутових відходів, хвостосховищах і системах захисту ґрунтових вод. Проаналізовано основні типи геобар'єрів, їхню ефективність та обмеження, пов'язані з хімічною сумісністю, деградацією структури й наявністю дефектів. Визначено основні механізми міграції забруднювачів. Запропоновано математичну модель процесів перенесення рідини, тепла і забруднювачів у пористому середовищі з урахуванням тонкого включення, яке імітує геотехнічний бар'єр. Модель описується системою рівнянь фільтраційної консолідації, теплоперенесення, масоперенесення та сорбції з відповідними умовами спряження на тонких включеннях. Для розв'язання задачі використано метод скінченних елементів. Числові експерименти показали, що врахування процесу сорбції істотно впливає на фільтраційні характеристики та консолідації ґрунтового масиву, що підтверджує необхідність урахування цих ефектів під час проектування довговічних геобар'єрів.

Ключові слова: ***геобар'єр, фільтрація, дифузія, сорбція, агресивний фільтрат, математичне моделювання, метод скінченних елементів***

I. ВСТУП

Геобар'єри (інженерні бар'єри на основі глини, геосинтетичних матеріалів або їхніх комбінацій) широко застосовуються як інженерні елементи у полігонах твердих побутових відходів, хвостосховищах та системах захисту ґрунтових вод. Їх головна функція — запобігання потраплянню забруднювачів (або мінімізація таких процесів) із техногенних масивів у навколишнє середовище. Проте довготривала ефективність бар'єрів залежить від гідравлічної провідності матеріалу, хімічної сумісності, наявності дефектів у геомембранах та деградації їх (бар'єрів) структури з часом.

Існують наступні основні типи геобар'єрів:

1. Композитні лайнери (GM + GCL + CCL). Це багатошарові системи, де геомембрана виконує роль первинного бар'єру, а глинисті шари забезпечують опір дифузії. Зокрема в роботі [1] показано, що тришарові системи залишаються ефективними навіть за наявності локальних дефектів у мембрані.
2. Вертикальні протифільтраційні стінки (soil-cement-bentonite). Даний тип геобар'єрів використовується для обмеження бокової міграції забруднювачів. В своїй праці [2] автори відмітили, що їхня (геобар'єрів) ефективність значною мірою визначається хімічною сумісністю з агресивними розчинами.
3. GCL (геосинтетичні глиняні бар'єри). В праці [3] автор встановив, що GCL забезпечують низьку дифузію навіть за зменшеного ущільнення, хоча з часом агресивний компонент фільтрату підвищує їхню провідність.

Основними механізмами міграції забруднювачів є:

- Фільтраційний потік: перенесення забруднювачів разом з потоком рідини при наявності градієнта напору.
- Дифузія: основний механізм за умов низьких швидкостей фільтрації та високої концентрації фільтрату.
- Адсорбція та іонний обмін: глини, зокрема бентоніт, мають високу ємність катіонного обміну, що дозволяє тимчасово утримувати метали та органічні сполуки.
- Десорбція та деградація: з часом забруднювачі можуть знову переходити у рухомі форми через зміни pH, йонного складу або розкладу органіки.

Усі ці процеси можуть призвести до зниження захисної функції геобар'єру або навіть до його «пробивання». Тому на даний час з'являються нові виклики (задачі), які потребують вирішення. Зокрема:

1. Довговічність геобар'єру. З часом глини можуть втрачати здатність до набухання, що знижує бар'єрну функцію
2. Хімічна сумісність. Взаємодія з агресивними компонентами фільтрату змінює гідравлічну провідність [4].
3. Стійкі органічні забруднювачі (PFAS). В праці [5] автори відзначили низьку ефективність традиційних бар'єрів проти PFAS, що вимагає нових або модифікованих матеріалів.

Одним із способів прогнозування перебігу процесів в пористих середовищах з геобар'єрами є математичне та комп'ютерне моделювання. [6, 7] Аналітичні та чисельні моделі дають змогу прогнозувати час «пробивання» бар'єру. Наприклад, в роботі [8] автори запропонували аналітичне рішення для композитної стінки SB–GCL–SB з урахуванням адвенції, дифузії та адсорбції, що є корисним інструментом для довгострокових прогнозів.

II. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ.

Об'єктом моделювання є обмежена розрахункова область Ω, що складається з двох підобластей Ω_1 та Ω_2, які представляють шари ґрунту. Ці підобласті розділені тонким включенням Ω товщиною d, яке імітує геотехнічний бар'єр (геобар'єр). Схематичне зображення розрахункової області наведено на рис. 1.

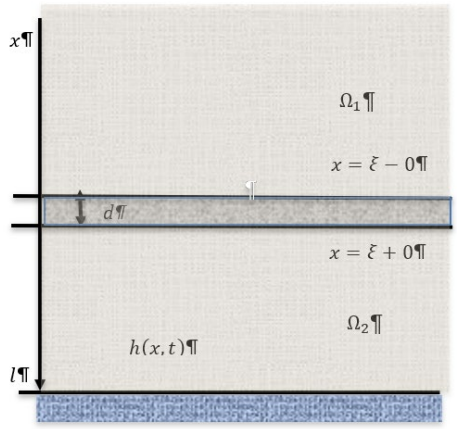


Рис. 1. Шар ґрунту товщиною l з тонким включенням товщиною d

Фізична складність системи полягає у значному контрасті властивостей між основним середовищем і включенням, що призводить до появи стрибків у функціях температури, напору та концентрації. Це вимагає введення відповідних умов спряження. Схожі задачі вже розглядалися нами раніше [9, 10].

Математична модель задачі містить наступні рівняння:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1+e}{\gamma a}\frac{\partial}{\partial x}\left(k^*(\mathrm{C},h,T)\frac{\partial h}{\partial x} - \nu\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial x} - \mu(h)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \varepsilon\frac{1+e}{\gamma a\delta}\left[n\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial t} - e\frac{\partial N}{\partial t}\right], x \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t \in (0,\underline{t}], t > 0 \quad (1)$$

$$c_s(h)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(h)\frac{\partial T}{\partial t}\right) - \rho_\omega c_\omega u(h,T)\frac{\partial T}{\partial t},\ x \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t > 0; \quad (2)$$

$$n\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_T\frac{\partial T}{\partial x}\right) - u(\mathrm{C},h,T)\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial x} - -\frac{\partial N}{\partial t},\ x \in \Omega_1 \cup \Omega_2,\ t > 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \gamma_1(Cn_0 - \alpha(T)N), x \in \bar{\Omega}_1 \cup \bar{\Omega}_2, t > 0. \quad (4)$$

Дані рівняння (1)-(4) доповнюються початковими та граничними умовами:

$$h(x,0) = h_0(x), C(x,0) = C_0(x), \quad T(x,0) = T_0(x), \quad N(x,t)|_{x=0} = N_0(x), \quad x \in \bar{\Omega}_1 \cup \bar{\Omega}_2;$$

$$h(x,t)|_{x=0} = \underline{h}_0(t), t \geq 0;$$

$$u(x,t)|_{x=l} = \left(-k^*(\mathrm{C},h,T)\frac{\partial h}{\partial x} + \nu\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial x} + \mu(h)\frac{\partial T}{\partial x}\right)|_{x=l} = 0, t \geq 0;$$

$$T(x,t)|_{x=0} = T_0(t), t \geq 0 \qquad q_T(x,t)|_{x=l} = -\lambda(h)\frac{\partial T}{\partial t}|_{x=l} = 0, \qquad t \geq 0$$

$$C(x,t)|_{x=0} = C_0(t),$$

$$q_C(x,t)|_{x=l} = -D\frac{\partial C}{\partial x} - D_T\frac{\partial T}{\partial x}|_{x=l} = 0$$

.

Умови спряження на тонкому включенні:

- Для напору:

$$u^+|_{\xi=d} = -\int_0^d \frac{\partial \sigma_0(T,\varsigma)}{\partial T}\frac{\partial T(\varsigma,t)}{\partial t}dt - \int_0^d \frac{\partial \sigma_0(C,\varsigma)}{\partial C}\frac{\partial C(\varsigma,t)}{\partial t}dt + \frac{1}{\rho}\int_0^d \frac{\partial N(\varsigma,t)}{\partial t}d\varsigma - \frac{1}{\int_0^d \frac{\partial \varsigma}{k_h(C,N,T)}d\varsigma}\left([h] - \int_0^d \frac{1}{k_h(C,N,T)}\int_0^\varsigma \frac{\partial \sigma_0(C,z)}{\partial C}\frac{\partial C(z,t)}{\partial t}dzd\varsigma - \int_0^d \frac{1}{k_h(C,N,T)}\int_0^\varsigma \frac{\partial \sigma_0(T,z)}{\partial T}\frac{\partial T(z,t)}{\partial t}dzd\varsigma + \int_0^d \frac{1}{k_h(C,N,T)}\cdot \frac{1}{\rho}\int_0^\varsigma \frac{\partial N(z,t)}{\partial t}dzd\varsigma - \frac{[C]}{d}\int_0^d \frac{k_C(C,N,T)}{k_h(C,N,T)}d\varsigma - \frac{[T]}{d}\int_0^d \frac{k_T(C,N,T)}{k_h(C,N,T)}d\varsigma\right),$$

$$u^-|_{\xi=0} = -\frac{1}{\int_0^d \frac{\partial \varsigma}{k_h(C,N,T)}d\varsigma}\left([h] - \int_0^d \frac{1}{k_h(C,N,T)}\int_0^\varsigma \frac{\partial \sigma_0(C,z)}{\partial C}\frac{\partial C(z,t)}{\partial t}dzd\varsigma - \int_0^d \frac{1}{k_h(C,N,T)}\int_0^\varsigma \frac{\partial \sigma_0(T,z)}{\partial T}\frac{\partial T(z,t)}{\partial t}dzd\varsigma + \int_0^d \frac{1}{k_h(C,N,T)}\cdot \frac{1}{\rho}\int_0^\varsigma \frac{\partial N(z,t)}{\partial t}dzd\varsigma - \frac{[C]}{d}\int_0^d \frac{k_C(C,N)}{k_h(C,N)}\frac{\partial C}{\partial \varsigma}d\varsigma - \frac{[T]}{d}\int_0^d \frac{k_T(C,N,T)}{k_h(C,N,T)}d\varsigma\right),$$

- Для температури:

$$q_T^\pm|_{x=\xi} = -\frac{[T]}{\int_0^d \frac{dx}{\lambda_\omega(h)}}$$

- Для концентрації хімічних речовин:

$$q_C^\pm|_{x=\xi} = -\frac{[C]}{\int_0^d \frac{dx}{\nu_\omega}} - \frac{[T]}{\int_0^d \frac{dx}{D_{T\omega}}}.$$

Числовий розв'язок вищенаведеної задачі знайдений методом скінченних елементів. Результати числових експериментів показали, що врахування процесу сорбції має значний вплив на величину просідань масиву ґрунту із геобарєром.

Література.

1. Li, J. et al. Review of the Anti-Pollution Performance of Triple-Layer Composite Liners. // Membranes 2022, 12(10), 922. https://doi.org/10.3390/membranes12100922.
2. Cao B, Xu J, Wang F, Zhang Y, O'Connor D. Vertical Barriers for Land Contamination Containment: A Review. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021; 18(23):12643. https://doi.org/10.3390/ijerph182312643
3. Lake, C.B. Migration of leachate constituents through a geosynthetic clay liner., // Clay Geosynthetic Barriers, 2022, DOI: 10.1201/9781003078777-21
4. Bannour, H. (2023). Effect of the durability of GCLs on Contaminants transfer through a composite liner exhibiting a hole in the geomembrane: A numerical approach. Conference Paper // 4th African Regional Conference on Geosynthetics (GeoAfrica 2023) https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336802001
5. Gates, W.P. et al. Review on PFAS interactions with landfill liners. // Applied Clay Science, 2020, 1(4): 007. doi:10.21926/aeer.2004007.
6. Michuta, O., Ivanchuk, N., Martyniuk, P., Ostapchuk, O. A finite-element study of elastic filtration in soils with thin inclusions // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 5(5-107), pp. 41–48 https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215047
7. Michuta, O., Ivanchuk, N., Martyniuk, P., Ostapchuk, O. A finite-element study of elastic filtration in soils with thin inclusions // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 5(5-107), pp. 41–48 https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215047
8. Peng, X. et al. (2024). Analytical Solution for Contaminant Transport through SB–GCL–SB Composite Walls. Processes.]
9. O. Ulianchuk-Martyniuk and O. Michuta Conjugation conditions in the problem of filtering chemical solutions in the case of structural changes to the material and chemical suffusion in the geobarrier // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2020, Volume 19, Number 1, 2020, Pages 141-154. http://dx.doi.org/10.17654/HM019010141
10. Michuta Olha R., Martyniuk Petro M. Nonlinear Evolutionary Problem of Filtration Consolidation With the Non-Classical Conjugation Condition // Journal of Optimization, Differential Equations and their Applications, 2022, 30(1), pp. 71–87. DOI: http://dx.doi.org/10.15421/142203

Дискретні періодичні шуми та їх використання при побудові періодичних послідовностей

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.098

Микола Приймак
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя.
м. Тернопіль, Україна.
pmw.ukr@ukr.net

Анотація—**Наведено означення дискретного періодичного білого шуму та визначені білі шуми з конкретними розподілами, проведена класифікацію таких шумів. Як приклад подані визначення рівномірного та пуассонівського періодичних шумів. Сформульовано теореми, згідно яких послідовності ковзного середнього і авторегресії при дії періодичного шуму є періодичними. Отримані результати відривають перспективні напрямки дослідження реальних періодичних шумів та послідовностей ковзного середнього і авторегресії, які використовуються при обґрунтуванні конструктивних моделей дискретних стохастично періодичних сигналів.**

Ключові слова — шум, дискретний шум, дискретний періодичний шум, класифікація періодичних шумів, періодичні послідовності ковзного середнього і авторегресії.

I. Вступ

Вагоме місце в теорії випадкових процесів посідають білі шуми, тобто процеси з незалежними значеннями. Розрізняють шуми з неперервним і дискретним аргументом (часом), які називають дискретними шумами. Серед дискретних шумів добре вивченими є стаціонарні шуми, зокрема базовий білий шум.

В прикладних дослідженнях часто зустрічаються шуми, характерною ознакою яких є стохастична періодичність. Проте такі шуми в порівнянні із стаціонарними вивчені в значно меншій мірі. Враховуючи це, актуальними є задачі дати визначення таких шумів, провести їх класифікацію та дослідити їх роль в утворенні періодичних випадкових послідовностей на прикладах ковзного середнього і авторегресії..

II. Результати

Білий шум.

Означення 1. Білим шумом з дискретним часом називається послідовність випадкових величин

$$\eta_i = \eta(i\Delta t), i \in Z, \quad (1)$$

будь-які два значення якої є некорельованими (незалежними).

Розрізняють дискретний білий шум в широкому і вузькому розумінні в залежності від того, якими є значення послідовності (1) – некорельованими чи незалежними. Розрізняють також шуми з конкретними розподілами – рівномірним, нормальним, Пуассона, Коші та іншими.

Означення 2. Білий шум (1) називається стаціонарним, якщо його випадкові величини однаково розподілені з деякою функцією розподілу

$$F(x) = P(\eta_i < x), i \in Z.$$

Періодичний білий шум. Ще одним класом шумів є періодичні шуми, які вперше були введені в [1].

Означення 3. Білий шум $\eta_i, i \in Z$, називається періодичним білим шумом, якщо періодичною з періодом L ($L > 1$, ціле) є його функція розподілу, тобто

$$F(x;i) = P(\eta_i < x) = F(x;i+L).$$

В пізніших роботах [2, 3] були визначені окремі види періодичних шумів в залежності від того, яким є їх розподіл – неперервними чи дискретними, а також від їх конкретного розподілу. Для прикладу наведемо декілька прикладів.

Приклад 1. Білий шум $\eta_i, i \in Z$, називається рівномірним періодичним шумом, якщо його випадкові величини рівномірно розподілені з щільністю розподілу

$$f_i(x)=\begin{cases} f_i(x), x\in[a_i,b_i], \\ 0, \quad x\notin[a_i,b_i]. \end{cases}$$

причому числа a_i та b_i утворюють періодичні послідовності з одним і тим же періодом L: $a_i=a_{i+L},\ b_i=b_{i+L},\ i\in Z.$

Приклад 2. Білий шум $\eta_i, i\in Z$, називається пуассонівським періодичним шумом, якщо для його розподілу $P(\eta_i=k)=\left(\lambda_i^k/k!\right)e^{-\lambda_i}$ параметр λ_i є періодичним з періодом L:. $\lambda_i=\lambda_{i+L}$

Крім наведених вище періодичних шумів мають місце періодичні шуми з іншими розподілами. Їх класифікацію, проведену в [3], подамо у вигляді таблиці.

Таблиця. Дискретні періодичні білі шуми (п.б.ш.).

Білі шуми з дискрет-ними розподілами	Білі шуми з неперервними розподілами	
Бернуллі п.б.ш.	рівномірний п.б.ш.	χ^2 п.б.ш.
біноміальний п.б.ш.	трикутний п.б.ш.	χ п.б.ш.
геометричний п.б.ш.	показниковий п.б.ш.	Стьюдента п.б.ш.
Пуассона п.б.ш.	нормальний п.б.ш.	F п.б.ш.
логарифмічний п.б.ш.	гама п.б.ш.	логістичний п.б.ш.

Періодичні послідовності ковзного середнього і авторегресії. Крім самостійного значення періодичні білі шуми є джерелом виникнення періодичності для послідовностей ковзного середнього і авторегресії. В [3, 4] сформульовані і доведені ряд теорем. Наведемо лише дві із них.

Теорема 1. Якщо для послідовності ковзного середнього

$$\xi_i=\sum_{k=0}^{\infty}a_k\eta_{i-k}, i\in Z, \qquad (2)$$

її породжуючий білий шум $\eta_i, i\in Z$, є періодичним з періодом *L*, то періодичною є послідовність (2) з цим же періодом .

Теорема 2. Якщо для послідовності авторегресії першого порядку

$$\xi_i=\rho\xi_{i-1}+\eta_i,\ |\rho|<1. \qquad (3)$$

її породжуючий білий шум $\eta_i, i\in Z$, є періодичним з періодом *L*, то авторегресія є періодична з цим же періодом.

Зауваження 1. Послідовності ковзного середнього і авторегресії є конструктивними моделями. Тому на відміну віл періодично корельованих чи періодичних послідовностей, які є описовими моделями і тільки постулюють періодичність, періодичні послідовності ковзного середнього і авторегресії ще вказують на механізм їх утворення, що використовується в прикладних дослідженнях.

Зауваження 2. Для дослідження послідовностей (2) і (3) можуть бути використані методи статистичного аналізу періодично корельованих чи періодичних послідовностей.

III. Висновки

Наведено означення дискретного періодичного білого шуму та визначені білі шуми з конкретними розподілами, проведена класифікацію таких шумів. Як приклад подані визначення рівномірного та пуассонівського періодичних шумів. Сформульовано теореми, згідно яких послідовності ковзного середнього і авторегресії при дії періодичного шуму є періодичними. Отримані результати відривають перспективні напрямки дослідження реальних періодичних шумів та послідовностей ковзного середнього і авторегресії, які використовуються при обґрунтуванні конструктивних моделей дискретних стохастично періодичних сигналів.

Список літератури

[1] Приймак Н.В. Оценка периода корреляции и ее использование при исследовании стохастически периодических радиотехнических сигналов. Автореф. дис. канд. техн. наук. 05.12.01. М.: МЭИ, 1987. 18.с.

[2] Приймак М.В. Дискретні періодичні білі шуми з неперервними розподілами // Праці Ін-ту електродинаміки. Електроенергетика. Київ: ІЕД НАН України, 1999. С. 15-19.

[3] Приймак М.В. Основи теорії моделювання, аналізу і прогнозу в автоматизованих системах управління ритмічними процесами: Автореф. дис…докт. техн. наук: 05.13.06 / Київ: НАУ, 2001. 34 с.

[4] Приймак М.В. Послідовності ковзного середнього при дії періодичного білого шуму // Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту. 1999. Том 4, число 2. С. 11-15.

Періодичні білі шуми з неперервним аргументом та їх використання при обгрунтуванні моделей стохастично періодичних сигналів

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.099

Микола Приймак
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя.
м. Тернопіль, Україна.
pmw.ukr@ukr.net

Анотація—**Із множини процесів з незалежними приростами виділено процеси з незалежними періодичними приростами та наведено визначення періодичного білого шуму з неперервним аргументом. В свою чергу із процесів з незалежними періодичними приростами виділені вінеровський і пуассонівський процеси з періодичними приростами та введено означення вінеровського та пуассонівського білих шумів. Доведено теорму, згідно якої лінійний процес, породжуючий процес якого є періодичним білим шумом, є періодичним. Отримані результати успішно використані при побудові моделі та оцінці періодичних математичного сподівання і дисперсії стохастично періодичних енергонавантажень.**

Ключові слова — процеси з незалежними періодичним приростами; періодичні білі шуми; вінеровський і пуассонівський періодичні шуми; лінійний періодичний процес.

I. Вступ

Одним із класів випадкових процесів є білі шуми з неперервним аргументом. Із цієї множини виділені стаціонарними шуми в рамках перших двох моментних функцій. Водночас в прикладних дослідженнях доволі часто зустрічаються стохастично періодичні шуми. Такі шуми теж мають самостійне значення, а також є причиною виникнення стохастичної періодичності різноманітних сигналів і явищ, проте їх вивченню приділяється менше уваги в порівнянні із стаціонарними шумами. Враховуючи це, актуальною є потреба визначити модель стохастично періодичних шумів; вияснити механізм, яким чином ці шуми генерують стохастичну періодичність реальних сигналів та розробити алгоритми їх дослідження.

II. Результати

Процеси з незалежними періодичними приростами. Періодичні білі шуми. Важливим кроком у вивченні моделей стохастично періодичних шумів стала робота [1], де вперше було визначено випадкові процеси з незалежними періодичними приростами в широкому розумінні та відповідні періодичні білі шуми. Пізніше в [2,3] було виділені процеси з незалежними періодичними приростами та періодичні білі шуми у вузькому розумінні. Останній варіант розглянемо більш детально.

Означення 1. Випадковий процес з незалежними приростами $\eta(t), t\in(-\infty,\infty)$, будемо називати процесом з незалежними періодичними приростами з періодом T , якщо періодичною по t є функція розподілу приросту $\Delta_h\eta(t)=\eta(t+h)-\eta(t)$ (диференціалу $d\eta(t)$):

$$F_{\Delta_h}(x;t)=P\left(\Delta_h\eta(t)<x\right)=P\left(\Delta_h\eta(t+T)<x\right)=F_{\Delta_h}(x;t+T)$$

Враховуючи, що частинними випадками процесів з незалежними приростами є вінеровський і пуассонівський процеси, в [2, 3] визначені окремі класи процесів які врахувують періодичність.

Означення 2. Періодичним білим шумом (у вузькому розумінні) називається узагальнена похідна від процесу з незалежними періодичними приростами.

Враховуючи, що частинними випадками процесів з незалежними приростами є вінеровський і пуассонівський процеси, в [2, 3] визначені окремі класи процесів які врахувують періодичність.

Означення 3. Вінеровський процес $\omega(t)$, прирости якого є періодичними, називається вінеровським процесом з незалежними періодичними приростами.

Означення 4. Пуассонівський процес $\pi(t)$, прирости якого є періодичними, називається пуассонівським процесом з незалежними періодичними приростами.

Означення 3а. Вінеровським (нормальним) періодичним білим шумом називається узагальнена похідна від вінеровського процесу з періодичними приростами.

Означення 4а. Пуассонівським періодичним білим шумом називається узагальнена похідна від пуассонівського процесу з періодичними приростами.

Лінійні випадкові процеси та їх зв'язок з періодичними процесами. Процеси з незалежними періодичними приростами та відповідні періодичні білі шуми крім самостійного значення є також причиною виникнення стохастичної періодичності ряду сигналів, систем тощо. Як приклад, на їх основі із класу лінійних випадкових процесів (ЛВП) виділені лінійні періодичні процеси [3]. Нагадаємо спочатку визначення цих.

Означення 5. Лінійний випадковий процес має зображення у вигляді стохастичного інтегралу

$$\xi(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(\tau,t)d\eta(\tau),\ t\in(-\infty,\infty) \qquad (1)$$

де при кожному фіксованому t невипадкова функція (ядро) $\varphi(\tau,t)\in L2(-\infty,\infty)$, $\eta(\tau)$ – випадковий процес з незалежними приростами (породжуючий процес), який може бути однорідним або неоднорідним.

ЛВП (1) має чітку фізичну інтерпретацію: його можна трактувати як відгук нестаціонарної (стаціонарної, якщо $\varphi(\tau,t)=\varphi(t-\tau)$) лінійної системи на дію білого шуму – узагальненої похідної від породжуючого процесу $\eta(\tau)$, що суттєво використовується при обґрунтуванні моделей сигналів імпульсного характеру, тобто сигналів типу дробового ефекту.

Основні результати щодо взаємозв'язку ЛВП та періодично процесів вперше були отримані в [3]. Наведемо лише одну із теорем, що показує цей зв'язок.

Теорема. Якщо для лінійного процесу

$$\xi(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(t-\tau)d\eta(\tau),\ t\in(-\infty,\infty) \qquad (2)$$

його ядро $\varphi(t-\tau)=\varphi(s)\in L_2(-\infty,\infty)$, а породжуючий процес $\eta(\tau)$ є процесом з незалежними періодичними приростами, то процес (2) буде періодичним (за Слуцьким).

Використавши форму запису процесу (2) у вигляді

$$\xi(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(t-\tau)\eta'(\tau)d\tau\ ,$$

де $\eta'(\tau)$ – узагальнена похідна від процесу з незалежними періодичними приростами, результат теореми можна інтерпретувати наступним чином. Якщо на лінійну стаціонарну систему надходить періодичний білий шум, то на виході такої системи процес буде періодичним.

Наведена теорема та інші близькі до неї теореми використовуються в задачах побудови моделей ряду стохастично періодичних сигналів імпульсного характеру. Так в [3] у вигляді лінійного періодичного процесу обґрунтована модель стохастично періодичних енергонавантажень, побудовані оцінки їх періодичних математичного сподівання і дисперсії.

III. Висновки

Із множини процесів з незалежними приростами виділено процеси з незалежними періодичними приростами та наведено визначення періодичного білого шуму з неперервним аргументом. В свою чергу із процесів з незалежними періодичними приростами виділені вінеровський і пуассонівський процеси з періодичними приростами та введено означення вінеровського та пуассонівського білих шумів. Доведено теорему, згідно якої лінійний процес, породжуючий процес якого є періодичним білим шумом, є періодичним. Отримані результати успішно використані при побудові моделі та оцінці періодичних математичного сподівання і дисперсії стохастично періодичних енергонавантажень.

Список використаних джерел

[1] Драган Я.П., Приймак Н.В. Линейные периодически коррелированые случайные процессы. – Львов, 1986. – 30 с. – (Препр. / АН УССР. Физико-механический ин-т, №120).

[2] Красильников О.І., Марченко Б.Г., Приймак М.В. Процеси з незалежними періодичними приростами і періодичні білі шуми // Відбір і обробка інформації. – 1996. – Вип. 10(86). – С. 22-27.

[3] Приймак М.В. Основи теорії моделювання, аналізу і прогнозу в автоматизованих системах управління ритмічними процесами: Автореф. дис…докт. техн. наук: 05.13.06 / Київ: НАУ, 2001. – 34 с.

Прогнозування часу до відмови трубопроводів з урахуванням корозії, дефектів і тиску

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.100

Назар Приходько
Кафедра математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії
НТУ «ХПІ»
Харків, Україна
Nazar.Prykhodko@infiz.khpi.edu.ua

Олександр Трубаєв
Кафедра математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії
НТУ «ХПІ»
Харків, Україна
trubayev@gmail.com

Анотація—**Розроблено математичну модель для прогнозування часу до відмови трубопроводів, що враховує процеси корозії, дефекти труби та тиск. Моделювання часу до відмови здійснюється за допомогою методу Монте-Карло, що дозволяє враховувати варіації параметрів корозії, дефектів та тиску.**

Ключові слова—корозія, дефекти, тиск, трубопроводи, метод Монте-Карло, прогнозування часу до відмови.

I. Вступ

Трубопроводи є невід'ємною частиною інфраструктури для транспортування рідин та газів на великі відстані. Однак, внаслідок тривалої експлуатації та впливу різноманітних факторів, таких як корозія, механічні дефекти та тиск, термін служби трубопроводів може значно знижуватись. Моделювання часу до відмови трубопроводів є критично важливим для своєчасного технічного обслуговування та забезпечення надійності системи [1,2]. У цьому контексті ми пропонуємо математичну модель, що враховує корозійні процеси, дефекти труби та вплив тиску на час до відмови.

Мета цієї роботи полягає в розробці математичної моделі для прогнозування часу до відмови трубопроводів з урахуванням корозії, дефектів та тиску. Для досягнення поставленої мети були визначені наступні задачі:

- Оцінка впливу корозії, дефектів та тиску на довговічність труби.
- Моделювання часу до відмови за допомогою методу Монте-Карло.
- Статистичний аналіз отриманих результатів і побудова гістограми часу до відмови.

II. Опис моделі

Модель базується на кількох ключових факторах, що визначають час до відмови труби:

A. Швидкість корозії

Для різних зон труби швидкість корозії може бути різною:

- Для звичайної зони труби (базової зони) швидкість корозії складає 0.05 мм/рік, для зварних швів — 0.6 мм/рік.
- Для напрямку вздовж труби швидкість корозії становить 0.1 мм/рік, а для перпендикулярного напрямку — 0.05 мм/рік.
- Швидкість корозії підлягає варіаціям з відхиленням 0.01 мм/рік.

B. Дефекти

Дефекти на трубі, такі як вм'ятини, можуть значно прискорювати процес корозії. Тому для кожної симуляції генерується випадковий дефект, що має:

- Глибину h від 0.1 до 2 мм.
- Розмір дефекту *size* від 1 до 5 мм.

Чим більша глибина дефекту, тим швидше відбувається корозія. Швидкість корозії коригується за допомогою коефіцієнта, що залежить від глибини дефекту:

$$K=k\cdot(1+0.1\cdot h/1мм) \quad (1)$$

де K коригована корозія, k некорегована корозія, h глибина дефекту в мм.

C. Вплив тиску

Тиск у трубопроводі також є важливим чинником, що впливає на корозію [3]. Чим більший тиск, тим більшою є швидкість корозії. Математично це описується так:.

$$K'=k\cdot(1+0.01\cdot P/P_{ном}) \quad (2)$$

де P— тиск в МПа, $P_{ном}$ – номінальний тиск $P_{ном}$ =1 МПа, K'–корозія з урахувнням тиску.

D. Час до відмови

Час до відмови труби T обчислюється через відношення початкової товщини труби до коригованої швидкості корозії:

$$T=S/K'' \quad (3)$$

де S — початкова товщина труби, а K'' коригована швидкість корозії враховує дефекти та вплив тиску.

E. Метод Монте-Карло

Для оцінки середнього часу до відмови та варіацій в нашій моделі ми використовуємо метод Монте-Карло. Це метод статистичного моделювання, який використовує випадкові величини для обчислення чисельних результатів [4,5]. У нашому випадку:

1. Кількість симуляцій: 1000.
2. Випадкова вибірка:

- Випадковим чином вибираються зони корозії (базова зона або зварний шов).
- Випадковим чином вибирається напрямок корозії (вздовж труби або перпендикулярно).
- Для кожної симуляції генерується випадковий дефект з випадковою глибиною та розміром.
- Розраховується час до відмови для кожної симуляції.

F. Прогнозування часу до відмови

Після виконання симуляцій проводиться статистичний аналіз результатів. Середній час до відмови μ розраховується як:

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} T_i \quad (4)$$

де N кількість симуляцій T_i час відмови для i-тої симуляції.

Варіація σ розраховується як:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(T_i - \mu)^2} \quad (5)$$

III. Результати

Після виконання симуляцій ми отримали статистичні характеристики для часу до відмови труби:

- Середній час до відмови труби в моделі становить 64.91 років.
- Стандартне відхилення часу до відмови — 30.16 років.

Це означає, що час до відмови в розглянутому випадку може варіюватися в межах 34.75 років до 95.07 років, в залежності від варіацій корозії, дефектів та тиску.

IV. Висновки

Модель дозволяє ефективно прогнозувати час до відмови трубопроводів, враховуючи ключові фактори, такі як корозія, дефекти та тиск. Середній час до відмови труби залежить від варіацій корозії, дефектів і тиску, і варіюється в широких межах. Отримані результати можуть бути використані для планування технічного обслуговування трубопроводів та для підвищення їхньої надійності.

Модель, яка була розроблена в цій роботі, є основою для подальших вдосконалень і може бути доповнена додатковими чинниками для досягнення більш точних та комплексних прогнозів. Це дозволить врахувати більшу кількість параметрів, що можуть впливати на час до відмови трубопроводів:

1. Вплив температури та хімічного складу середовища: Ці фактори можуть значно впливати на процеси корозії. Наприклад, підвищена температура прискорює корозію, а агресивні хімічні речовини можуть прискорювати її ще більше. Для більш точної моделі слід врахувати ці фактори, що дозволить робити прогнози для трубопроводів, що працюють в різних умовах.

2. Врахування напружено_деформованного стану: Механічні навантаження, такі як коливання тиску або зовнішні удари, можуть також мати великий вплив на знос труб. Тому модель можна вдосконалити, враховуючи вплив таких навантажень на напружено-деформований стан труби, що дозволить отримати більш точні прогнози щодо терміну служби, особливо для трубопроводів, що експлуатуються в умовах високих напружень і деформацій.

3. Розширення моделі на інші типи дефектів і пошкоджень**:** Додаткове вдосконалення моделі передбачає розширення її можливостей для включення різних типів дефектів труб, таких як тріщини, ерозія та інші фізичні пошкодження. Це дозволить точніше моделювати реальні умови експлуатації трубопроводів, де дефекти можуть виникати не тільки через корозію, а й через механічні пошкодження чи інші фактори.

Завдяки цим вдосконаленням модель стане більш універсальною та здатною враховувати широкий спектр умов експлуатації трубопроводів, що зробить її важливим інструментом для планування надійності та довговічності трубних систем.

References

[1] Carneiro J. O., Melo F., Rodrigues J., Lopes H., Teixeira V. The modal analysis of a pipe elbow with realistic boundary conditions // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2005. Vol. 82. P. 593–601.

[2] Zhang B., Xing Z.-Y., Wang T., Wang Z. The vibration characteristics and allowable span length of free span submarine pipeline // Proceedings of the 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (MME-16). 2017. P. 118–123.

[3] Петрина, Д. Ю. Вплив корозійного середовища на сучасні сталі магістральних трубопроводів / Д. Ю. Петрина, Л. Г. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2022. - № 2. - С. 95-104.

[4] Zhou Y., Wang J. Time-varying reliability analysis of corroded gas pipelines using Monte Carlo simulation // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 289. – Article ID 115982.

[5] Seghier M.E.A.B., et al. Comparative study on the efficiency of simulation and meta-model-based Monte Carlo techniques for accurate reliability analysis of corroded pipelines // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, No. 10. – Article ID 5830.

Modeling, control and information technologies – 2025

Про розв'язки матричного многочленного рівняння $A(\lambda)X(\lambda)+Y(\lambda)B(\lambda)=C(\lambda)$ *над полем*

Volodymyr Prokip[a]
IAPMM NAS of Ukraine,
3b Naukova Str., L'viv, Ukraine, 79601
e-mail: v.prokip@gmail.com

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.101

Анотація – **Розглядається матричне рівняння Сильвестра** $A(\lambda)X(\lambda)+Y(\lambda)B(\lambda)=C(\lambda)$, **де** $A(\lambda),B(\lambda)$ **і** $C(\lambda)$ **відомі многочленні матриці над довільним полем, а** $X(\lambda)$ **та** $Y(\lambda)$ **невідомі матриці. Наведено умови, за яких рівняння Сильвестра сумісне для довільної матриці** $C(\lambda)$**. Запропоновано метод знаходження розв'язків рівняння Сильвестра у випадку, коли визначники матриць** $A(\lambda)$ **і** $B(\lambda)$ **є взаємно простими та вказано структуру його загального розв'язку. Крім цього наведено умови, за яких розв'язок рівняння Сильвестра визначений однозначно.**

Ключові слова — кільце многочленів, матриця, рівняння Сильвестра, розв'язок

I. Вступ

Нехай R – комутативне кільце з одиницею. Введемо позначення: $R_{m,n}$ – множина $m\times n$ матриць над R, $GL(m,R)$ – множина оборотних матриць в $R_{m,m}$, I_n – одинична $n\times n$ матриця і $0_{m,n}$ – нульова матриця вимірності $m\times n$. Якщо $R=F$ поле, то $F[\lambda]$ кільце многочленів над полем F.

Розглянемо матричне рівняння

$$AX+YB=C, \qquad (1)$$

де $A\in R_{m,m}, B\in R_{n,n}, C\in R_{m,n}$, а X та Y невідомі $m\times n$ матриці над R. Рівняння (1) називають також матричним рівнянням Сильвестра. Якщо в рівнянні (1) матриця A лівий дільник матриці C або матриця B правий дільник матриці C, то рівняння (1) розв'язне. Зрозуміло, що в цих випадках задача про розв'язність рівняння (1) є тривіальною. Зауважимо, що рівняння (1) є одним із найвідоміших матричних рівнянь у теорії матриць та її застосуваннях (див. [15], [17], [18]).

Основною проблемою при дослідженні рівняння (1) є встановлення умов його розв'язності, описання структури його розв'язків та методів їх побудови. Якщо рівняння (1) сумісне над R, то матриці $M_C=\begin{bmatrix} A & C \\ 0_{n,m} & B \end{bmatrix}$ і $M_0=\begin{bmatrix} A & 0_{m,n} \\ 0_{n,m} & B \end{bmatrix}$ еквівалентні. Рот (Roth, [26]) довів, що рівняння (1) над полем F сумісне тоді і тільки тоді, коли матриці M_C і M_0 еквівалентні над F. Інше доведення теореми Рота наведено в роботі [11]. В роботі [23] показано, що цей результат не допускає узагальнення для випадку нескінченної розмірності матриць A, B і C у рівнянні (1).

Існує значна кількість статтей з лінійної алгебри та теорії матриць, в яких досліджується рівняння Сильвестра. Багато авторів досліджували умови, за яких для рівняння (1) над полем, зокрема над полем дійсних та комплексних чисел, існують розв'язки з певними властивостями (див. [3], [7], [8], [20], [21], [28], [30]). В роботах [19], [29] наведено умови сумісності рівняння (1) над тілом кватерніонів, а в роботах [9], [13], [22], [25] над комутативними кільцями.

Джонс (Jones, [14]) показав, що умова Рота сумісності рівняння (1) є вірною у випадку, якщо R кільце аналітичних функцій над полем комплексних чисел. Густафсон (Gustafson) в роботі [12] довів, що рівняння (1) над комутативним кільцем R з одиницею сумісне тоді і тільки тоді, коли матриці M_C і M_0 еквівалентні над кільцем R.

Умови, за яких для рівняння (1) над кільцем $F[\lambda]$ існують мінімальні розв'язки, тобто такі, що $\deg X(\lambda)<\deg B(\lambda)$ (або $\deg Y(\lambda)<\deg A(\lambda)$), наведено в роботах [2], [4], [5], [10], [24], [27]. Методи побудови розв'язків рівняння (1) при тих чи інших обмеженнях запропоновано в роботах [1–3], [6], [16], [25].

В даній статті розглядається матричне ріняння Сильвестра $A(\lambda)X(\lambda)+Y(\lambda)B(\lambda)=C(\lambda)$, де $A(\lambda)$, $B(\lambda)$ і $C(\lambda)$ відомі неособливі многочленні матриці над довільним полем F, а $X(\lambda)$ та $Y(\lambda)$ невідомі многочленні матриці над F. Наведено умови, за яких рівняння Сильвестра сумісне. Запропоновано метод знаходження розв'язків рівняння Сильвестра у випадку, коли визначники матриць $A(\lambda)$ і $B(\lambda)$ є взаємно простими та вказано структуру його загального розв'язку. Крім цього, наведено умови, за яких розв'язок рівняння Сильвестра визначений однозначно. Зауважимо, що окремі з наведених результатів є вірними для матричного рівняння Сильвестра над областями Безу.

II. Основні результати

Надалі $R = F[\lambda]$ – кільце многочленів над довільним полем F. Під записом $(a(\lambda), b(\lambda)) = d(\lambda)$ будемо розуміти, що $d(\lambda) \in F[\lambda]$ є найбільшим спільним дільником многочленів $a(\lambda), b(\lambda) \in F[\lambda]$. Відомо, що для многочленів $a(\lambda), b(\lambda) \in F[\lambda]$ існує єдина пара многочленів $p(\lambda), q(\lambda) \in F[\lambda]$ таких, що $a(\lambda) = p(\lambda)b(\lambda) + q(\lambda)$ і $\deg q(\lambda) < \deg b(\lambda)$.

Розглянемо неоднорідне діофантове рівняння

$$a(\lambda)x(\lambda) + b(\lambda)y(\lambda) = c(\lambda), \qquad (2)$$

де $a(\lambda), b(\lambda), c(\lambda) \in F[\lambda]$ відомі многочлени, а $x(\lambda)$ та $y(\lambda)$ невідомі многочлени над F. Відомо, що рівняння (2) є розв'язним тоді й тільки тоді, коли найбільший спільний дільник $a(\lambda)$ і $b(\lambda)$ є дільником $c(\lambda)$, тобто $(a(\lambda), b(\lambda)) \mid c(\lambda)$. Нехай пара многочленів $x_0(\lambda), y_0(\lambda) \in F[\lambda]$ – розв'язок рівняння (2). Якщо ж для цього розв'язку виконується одна з умов:

$$\deg x_0(\lambda) < \deg b(\lambda) \text{ або } \deg y_0(\lambda) < \deg a(\lambda),$$

то такий розв'язок називають мінімальним. Зазначимо, якщо рівняння (2) є розв'язним, то серед його розв'язків існують мінімальні (див. [2]).

Твердження 1. *Нехай* $a(\lambda), b(\lambda), c(\lambda) \in F[\lambda]$. *Нехай, далі,* $\deg a(\lambda) = p \geq 1$ *і* $\deg b(\lambda) = q \geq 1$. *Рівняння* (2) *має єдиний мінімальний розв'язок* $x_0(\lambda), y_0(\lambda)$ *такий, що* $\deg y_0(\lambda) < \deg a(\lambda)$, *тоді й тільки тоді, коли многочлени* $a(\lambda)$ *і* $b(\lambda)$ *є взаємно простими*.

Доведення. *Необхідність* доведена в [2].

Достатність. Нехай $x_0(\lambda)$, $y_0(\lambda) \in F[\lambda]$ – єдиний мінімальний розв'язок рівняння (2), тобто $a(\lambda)x_0(\lambda) + b(\lambda)y_0(\lambda) = c(\lambda)$, $\deg x_0(\lambda) < \deg b(\lambda)$. Припустимо, що $(a(\lambda), b(\lambda)) = d(\lambda) \neq const$. Отже, $a(\lambda) = d(\lambda)a_1(\lambda)$, $b(\lambda) = d(\lambda)b_1(\lambda)$, $c(\lambda) = d(\lambda)c_1(\lambda)$ і $a_1(\lambda)d(\lambda)x_0(\lambda) + b_1(\lambda)d(\lambda)y_0(\lambda) = c_1(\lambda)d(\lambda)$.

Так як $0 \leq \deg x_0(\lambda) - \deg b_1(\lambda) < \deg b(\lambda)$, то пара многочленів $x_0(\lambda) - b_1(\lambda)$, $y_0(\lambda) + a_1(\lambda)$ є мінімальним розв'язком рівняння (2), тобто

$$a_1(\lambda)d(\lambda)(x_0(\lambda) - b_1(\lambda)) + b_1(\lambda)d(\lambda)(y_0(\lambda) + a_1(\lambda)) = c(\lambda)_1 d(\lambda).$$

Отже, якщо многочлени $a(\lambda)$ і $b(\lambda)$ не є взаємно простими, то рівняння (2) має принаймі два мінімальних розв'язки. Проте це не узгоджується із припущенням про те, що мінімальний розв'язок рівняння $a(\lambda)x(\lambda) + b(\lambda)y(\lambda) = c(\lambda)$ єдиний при умові $(a(\lambda), b(\lambda)) = d(\lambda) \neq const$.

Таким чином доведено, що мінімальний розв'язок рівняння $a(\lambda)x(\lambda) + b(\lambda)y(\lambda) = c(\lambda)$ єдиний тоді і тільки тоді, коли $(a(\lambda), b(\lambda)) = 1$. Твердження доведено.

Аналогічно доводиться наступне твердження.

Твердження 1а. *Нехай* $a(\lambda), b(\lambda), c(\lambda) \in F[\lambda]$. *Нехай, далі,* $\deg a(\lambda) = p \geq 1$ *і* $\deg b(\lambda) = q \geq 1$. *Рівняння* (2) *має єдиний мінімальний розв'язок* $x_0(\lambda), y_0(\lambda)$ *такий, що* $\deg x_0(\lambda) < \deg b(\lambda)$, *тоді й тільки тоді, коли многочлени* $a(\lambda)$ *і* $b(\lambda)$ *є взаємно простими*.

Зауважимо, що доведення достатності у твердженні 1 є альтернативним до його доведення у твердженні 1 в роботі [2].

Надалі будемо розглядати матричне рівняння

$$A(\lambda)X(\lambda) + Y(\lambda)B(\lambda) = C(\lambda), \qquad (3)$$

де $A(\lambda) \in F_{m,m}[\lambda]$ та $B(\lambda) \in F_{n,n}[\lambda]$ – неособливі матриці і $C(\lambda) \in F_{m,n}[\lambda]$. При заданих обмеженнях для рівняння (3) наведемо умови його сумісності та опишемо структуру його розв'язків.

Твердження 2. *Нехай в рівнянні (3) матриці* $A(\lambda)$ *і* $B(\lambda)$ *неособливі. Нехай, далі, має місце* $(\det A(\lambda), \det B(\lambda)) = d(\lambda)$. *Якщо рівняння* (3) *сумісне, то*

$$A^*(\lambda)C(\lambda)B^*(\lambda) = d(\lambda)Q(\lambda), \qquad (4)$$

де $A^*(\lambda)$ *і* $B^*(\lambda)$ *приєднані матриці до матриць* $A(\lambda)$ *і* $B(\lambda)$ *відповідно*.

Доведення. Нехай рівняння (3) сумісне, тобто $A(\lambda)X_0(\lambda) + Y_0(\lambda)B(\lambda) = C(\lambda)$. Звідси дістаємо

$$\det A(\lambda)X_0(\lambda)B^*(\lambda) + A^*(\lambda)Y_0(\lambda)\det B(\lambda) = A^*(\lambda)C(\lambda)B^*(\lambda).$$

Звідси отримуємо, що $d(\lambda) = (\det A(\lambda), \det B(\lambda))$ є дільником елементів матриці $A^*(\lambda)C(\lambda)B^*(\lambda)$, тобто $A^*(\lambda)C(\lambda)B^*(\lambda) = d(\lambda)Q(\lambda)$. Твердження доведено.

Нижче опишемо клас рівнянь (3) над $F[\lambda]$, для яких умова (4) твердження 2 буде достатньою.

Теорема 1. *Нехай для неособливих матриць* $A(\lambda) \in F_{m,m}[\lambda]$ *і* $B(\lambda) \in F_{n,n}[\lambda]$ *виконується* $(\det A(\lambda), \det B(\lambda)) = d(\lambda)$. *Тоді для довільної матриці* $C(\lambda) \in F_{m,n}[\lambda]$ *рівняння*

$$A(\lambda)X(\lambda) + Y(\lambda)B(\lambda) = d(\lambda)C(\lambda) \qquad (5)$$

сумісне над $F[\lambda]$.

Доведення. Покладемо $\det A(\lambda) = a(\lambda)$ і $\det B(\lambda) = b(\lambda)$. Для многочленів $a(\lambda)$ і $b(\lambda)$ існують многочлени $u(\lambda), v(\lambda) \in F[\lambda]$ такі, що

$a(\lambda)u(\lambda)+b(\lambda)v(\lambda)=d(\lambda)$. Отже, для довільної матриці $C(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda]$ отримуємо

$$a(\lambda)u(\lambda)C(\lambda)+v(\lambda)C(\lambda)b(\lambda)=d(\lambda)C(\lambda). \quad (6)$$

Рівність (6) перепишемо у вигляді

$$A(\lambda)\left(A^{*}(\lambda)C(\lambda)u(\lambda)\right)+\left(C(\lambda)B^{*}(\lambda)v(\lambda)\right)B(\lambda)=d(\lambda)C(\lambda). \quad (7)$$

Тепер із рівності (7) дістаємо, що для матриць

$$X_0(\lambda)=u(\lambda)A^{*}(\lambda)C(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda],$$

$$Y_0(\lambda)=v(\lambda)C(\lambda)B^{*}(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda]$$

виконується $A(\lambda)X_0(\lambda)+Y_0(\lambda)B(\lambda)=d(\lambda)C(\lambda)$.

Отже, рівняння (5) сумісне. Матриці $X_0(\lambda)$ і $Y_0(\lambda)$ будемо називати частинним розв'язком рівняння (5).

Тепер неважко переконатись в тому, що для довільної матриці $G(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda]$ пара матриць

$$X_G(\lambda)=X_0(\lambda)+b(\lambda)A^{*}(\lambda)G(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda],$$

$$Y_G(\lambda)=Y_0(\lambda)-a(\lambda)G(\lambda)B^{*}(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda]$$

є загальним розв'язком рівняння (5). Лему доведено.

Наслідок 1. *Нехай матриці* $A(\lambda)\in F_{m,m}[\lambda]$ *і* $B(\lambda)\in F_{n,n}[\lambda]$ *– неособливі і* $C(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda]$. *Нехай, далі,* $(\det A(\lambda),\det B(\lambda))=d(\lambda)$. *Якщо* $C(\lambda)=d(\lambda)C_1(\lambda)$, *то матричне рівняння*

$$A(\lambda)X(\lambda)+Y(\lambda)B(\lambda)=C(\lambda)$$

сумісне.

Якщо $A(\lambda)\in F_{m,m}[\lambda]$ і $B(\lambda)\in F_{n,n}[\lambda]$ неособливі із взаємно простими визначниками, тобто $(\det A(\lambda),\det B(\lambda))=1$, то на підставі наслідку 1 отримуємо, що рівняння (3) сумісне для довільної матриці $C(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda]$. З огляду на твердження 1, теорему 1 та наслідок 1 отримуємо.

Наслідок 2. *Нехай визначники неособливих матриць* $A(\lambda)\in F_{m,m}[\lambda]$ *і* $B(\lambda)\in F_{n,n}[\lambda]$ *взаємно прості, тобто* $(\det A(\lambda),\det B(\lambda))=1$. *Нехай, далі,* $u(\lambda),v(\lambda)\in F[\lambda]$ *такі, що*

$$u(\lambda)(\det A(\lambda))+v(\lambda)(\det B(\lambda))=1$$

Якщо $\deg u(\lambda)<\deg\det B(\lambda)$, *то для довільної матриці* $C(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda]$ *частинний розв'язок*

$$X_0(\lambda)=u(\lambda)A^{*}(\lambda)C(\lambda),\ Y_0(\lambda)=v(\lambda)C(\lambda)B^{*}(\lambda)$$

рівняння $A(\lambda)X(\lambda)+Y(\lambda)B(\lambda)=C(\lambda)$ *многочленом* $u(\lambda)$ *визначається однозначно.*

Наслідок 3. *Нехай визначники неособливих матриць* $A(\lambda)\in F_{m,m}[\lambda]$ *і* $B(\lambda)\in F_{n,n}[\lambda]$ *взаємно прості, тобто* $(\det A(\lambda),\det B(\lambda))=1$. *Нехай, далі,* $u(\lambda),v(\lambda)\in F[\lambda]$ *такі, що*

$$u(\lambda)(\det A(\lambda))+v(\lambda)(\det B(\lambda))=1.$$

Якщо $\deg v(\lambda)<\deg\det A(\lambda)$, *то для довільної матриці* $C(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda]$ *частинний розв'язок*

$$X_0(\lambda)=u(\lambda)A^{*}(\lambda)C(\lambda),\ Y_0(\lambda)=v(\lambda)C(\lambda)B^{*}(\lambda)$$

рівняння $A(\lambda)X(\lambda)+Y(\lambda)B(\lambda)=C(\lambda)$ *многочленами* $u(\lambda)$ *і* $v(\lambda)$ *визначається однозначно.*

Наведений вище результат проілюструємо на прикладі. Нехай $F\in\boldsymbol{Q}$ – поле раціональних чисел.

Приклад. *Розглянемо неособливі многочленні матриці* $A(\lambda)=\begin{bmatrix}\lambda^2+3\lambda & 2\\ -2 & 1\end{bmatrix}$ *і* $B(\lambda)=\begin{bmatrix}1 & -1\\ 4\lambda+5 & \lambda^2\end{bmatrix}$ *над полем* $\boldsymbol{Q}$ *із визначниками* $\det A(\lambda)=\lambda^2+3\lambda+4$ *і* $\det B(\lambda)=\lambda^2+4\lambda+5$ *відповідно і* $C(\lambda)=\begin{bmatrix}\lambda+2 & \lambda^2+4\lambda\\ 1 & 2\lambda+3\end{bmatrix}$.

Для $\det A(\lambda)$ *і* $\det B(\lambda)$ *існує єдина пара многочленів* $u(\lambda)=0{,}5\lambda+1{,}5$ *і* $v(\lambda)=-0{,}5\lambda-1$ *таких, що* $u(\lambda)(\det A(\lambda))+v(\lambda)(\det B(\lambda))=1$ *і* $\deg u(\lambda)<\deg\det B(\lambda)$. *Тоді пара матриць*

$$X_0(\lambda)=u(\lambda)A^{*}(\lambda)C(\lambda)=$$

$$\begin{bmatrix}(\lambda^2+4\lambda+3)/2 & (\lambda^3+5\lambda^2+3\lambda-9)/2\\ (\lambda^3+5\lambda^2+9\lambda+9)/2 & (2\lambda^4+14\lambda^3+39\lambda^2+60\lambda+45)/2\end{bmatrix},$$

$$Y_0(\lambda)=v(\lambda)C(\lambda)B^{*}(\lambda)=$$

$$\begin{bmatrix}(3\lambda^4+25\lambda^3+58\lambda^2+40\lambda)/2 & (-\lambda^3-7\lambda^2-12\lambda-4)/2\\ (7\lambda^3+36\lambda^2+59\lambda+30)/2 & -\lambda^2-4\lambda-4\end{bmatrix}$$

єдиний частинний розв'язок заданого рівняння.

Тепер за частинним розв'язком заданого рівняння легко побудувати його загальний розв'язок.

Враховуючи твердження 1 і 1а встановимо умови існування "*мінімальних*" розв'язків матричного рівняння (3). Наступні теореми узагальнюють основні результати робіт [4], [10] і [24].

Теорема 2. *Нехай матриці* $A(\lambda)\in F_{m,m}[\lambda]$ *та* $B(\lambda)\in F_{n,n}[\lambda]$ *неособливі і* $C(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda]$. *Нехай, далі,* $B(\lambda)$ *лівоеквівалентна регулярній многочленній матриці, тобто існує зворотна матриця* $W(\lambda)\in GL(n,F[\lambda])$ така, що

$$W(\lambda)B(\lambda)=I_n\lambda^r+\sum_{i=1}^{r}D\lambda^{r-i},\ \text{де } r<\deg B(\lambda).$$

Рівняння $A(\lambda)X(\lambda)+Y(\lambda)B(\lambda)=C(\lambda)$ *має єдиний розв'язок* $\{X_0(\lambda),Y_0(\lambda)\}$ *такий, що* $\deg X_0(\lambda)<r$ *тоді і тільки тоді, коли визначники матриць* $A(\lambda)$ *і* $B(\lambda)$ *взаємно прості.*

Теорема 3. *Нехай матриці* $A(\lambda)\in F_{m,m}[\lambda]$ *та* $B(\lambda)\in F_{n,n}[\lambda]$ *неособливі і* $C(\lambda)\in F_{m,n}[\lambda]$. *Нехай, далі,* $A(\lambda)$ *правоеквівалентна регулярній многочленній матриці, тобто існує зворотна матриця* $W(\lambda)\in GL(m,F[\lambda])$ така, що

$$A(\lambda)W(\lambda)=I_n\lambda^r+\sum_{i=1}^{r}D\lambda^{r-i},\ \text{де } r<\deg B(\lambda).$$

Рівняння $A(\lambda)X(\lambda)+Y(\lambda)B(\lambda)=C(\lambda)$ *має єдиний розв'язок* $\{X_0(\lambda),Y_0(\lambda)\}$ *такий, що* така, що $\deg Y_0(\lambda)<r$ *тоді і тільки тоді, коли визначники матриць* $A(\lambda)$ *і* $B(\lambda)$ *взаємно прості.*

З огляду на результати Розділу 2 та роботи [2], [4], [10] і [24] зазначимо, що єдині мінімальні розв'язки матричного рівняння (3) існують лише у випадку, коли неособливі матриці $A(\lambda)$ і $B(\lambda)$ мають взаємно прості визначники. Такі розв'язки розділимо на три класи:

1) Мінімальні розв'язки рівняння (3), які визначаються принаймі однією регулярною матрицею $A(\lambda)$ або $B(\lambda)$, або одніє з неособливих матриць $A(\lambda)$ або $B(\lambda)$, яка односторонніми перетвореннями еквівалентності приводиться до регулярної многочленної матриці;

2) Мінімальні розв'язки рівняння (3), які визначаються формою Ерміта однієї з неособливих матриць $A(\lambda)$ або $B(\lambda)$;

3) Мінімальні розв'язків рівняння (3), які визначаються єдиним мінімальним розв'язком рівняння $u(\lambda)(\det A(\lambda)) + v(\lambda)(\det B(\lambda)) = 1$.

Література

[1] В.М. Прокіп, "Про подільність із залишком матриць над областю головних ідеалів," Мат. методи та фіз.-мех. поля, , 2017, Т. 60. № 2, С. 41–50.

Те саме: V. M. Prokip, "On the divisibility of matrices with remainder over the domain of principal ideals," J. Math. Sci., 2019, vol. 243, No. 1., pp. 45–55.
https://doi.org/10.1007/s10958-019-04524-2

[2] В.М. Прокіп, О.М. Мельник, Р.В. Коляда, "Про подільність із остачею многочленних матриць над довільним полем," Мат. методи та фіз.-мех. поля, 2023, Т. **66**, № 1-2., С. 23–39.

Те саме: V.M. Prokip, O.M. Mel'nyk, R.V. Kolyada, "On the divisibility with remainder of polynomial matrices over an arbitrary field," J Math. Sci., 2025, Vol. **291**. No 5., pp. 586–607.
https://doi.org/10.1007/s10958-025-07839-5

[3] J. K. Baksalary, R. Kala, "The matrix equation ax−yb=c," Linear Algebra Appl., 1979, Vol.**25,** pp. 41–43.
https://doi.org/10.1016/0024-3795(79)90004-1

[4] S. Barnett, "Regular polynomial matrices having relatively prime determinants," Math. Proc. Camb. Phil. Soc., 1969, Vol. **65**, No.3., pp.585–590.
https://doi.org/10.1017/S0305004100003364

[5] S. Chen, Y. Tian, "On solutions of generalized Sylvester equation in polynomial matrices," J. Franklin Inst., 2014, Vol. **351**, No. 12., pp. 5376–5385.
https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.09.024

[6] D.S. Cvetković-Ilić, J. Nikolov Radenković and Q-W. Wang, "Algebraic conditions for the solvability to some systems of matrix equations," Linear Multilinear Algebra, 2021, Vol.**69**, No. 9., – pp 79–1609.
https://doi.org/10.1080/03081087.2019.1633993

[7] A. Dmytryshyn, B. Kågström, "Coupled Sylvester-type matrix equations and block diagonalization," SIAM J. Matrix Anal. Appl., 2015, Vol.**36**, No.2., pp. 580–593.
https://doi.org/10.1137/151005907

[8] A.E. Emre, L.M. Silverman, "The equation XR+QY=Φ: a characterization of solutions," SIAM J. Control Optim., 1981, Vol. **19**, No.1., pp. 33–38. https://doi.org/10.1137/0319003

[9] R.B. Feinberg, "Equivalence of partitioned matrices," Res. Nat. Bur. Standards, 1976, **80B**, No.1., pp. 89–97.

[10] J. Feinstein, Y. Bar-Ness, "On the uniqueness minimal solution to the matrix polynomial equation A(λ)X(λ)–Y(λ)B(λ)=C(λ)," J. Franklin Inst., 1980, Vol. **310**, No. 2., pp. 131–134.
https://doi.org/10.1016/0016-0032(78)90012-1.

[11] H. Flanders, H.K. Wimmer, "On the matrix equations AX-XB=C and AX-YB=C," SIAM J. Appl. Math., 1977, Vol. **32**, № 4., pp. 707–710. https://doi.org/10.1137/0132058

[12] W.H. Gustafson, "Roth's theorems over commutative rings," Linear Algebra Appl., 1979,.Vol. **23**, pp. 245–251.
https://doi.org/10.1016/0024-3795(79)90106-X

[13] R.E. Hartwig, "Roth's equivalence problem in unit regular rings," Proc. Amer. Math. Soc., 1976, Vol.59, No.1., pp. 39-44. https://doi.org/10.1090/S0002-9939-1976-0409543-4

[14] J. (Jr.) Jones, "A Diophantine matrix equation," Amer. Math. Monthly, 1955, Vol. **62**, No.4., pp. 244–247.
https://doi.org/10.2307/2306696

[15] T. Kaczorek, "Polynomial and rational matrices. Applications in dynamical systems theory," London: Springer, 2007, 503 p.

[16] Y. Ke, C. Ma, "An alternating direction method for nonnegative solutions of the matrix equation AX+YB=C," Comput. Appl. Math., 2017, Vol. 36, No.1., pp. 359–365.
https://doi.org/10.1007/s40314-015-0232-5

[17] T. Kailath, "Linear Systems," Prentice Hall, New Jersey; 1980, 682 p.

[18] V. Kucera, "Analysis and Design of Discrete Linear Control Systems," Prentice Hall, New York, 1991, 472 p.

[19] I. Kyrchei, "Cramer's rules for sylvester quaternion matrix equation and its special cases," Adv. Appl. Clifford Algebr., 2018, Vol. **28**, pp. 1–26.
https://doi.org/10.1007/s00006-018-0909-0

[20] Lin M., Wimmer H.K. "The generalized Sylvester matrix equation, rank minimization and Roth's equivalence theorem" // Bul. Aust. Math. Soc. – 2011. – Vol. **84,** No.3. – P. 441–443.
https://doi.org/10.1017/S0004972711002334

[21] Y.H. Liu, "Ranks of solutions of the linear matrix equation AX + YB=C," Comp. Math. Appl., 2006, Vol.**52**, No.6-7,. pp. 861–872. https://doi.org/10.1016/j.camwa.2006.05.011

[22] N. Ito, H.K. Wimmer, "Rank minimization of generalized Sylvester equations over Bezout domains," Linear Algebra Appl., 2013, Vol.**439**, No.3., pp. 592–599.
https://doi.org/10.1016/j.laa.2012.11.012

[23] V. Olshevsky, "Similarity of block diagonal and block triangular matrices," Integral Equations Operator Theory, 1992, Vol. **15**, No.5. , pp. 853–863.
https://doi.org/10.1007/BF01200704

[24] V.M. Prokip, "About the uniqueness solution of the matrix polynomial equation A(λ)X(λ)–Y(λ)B(λ)=C(λ)," Lobachevskii J. Math., 2008, Vol.**29**, No.3., pp. 186–191.
https://doi.org/10.1134/S1995080208030098

[25] V. Prokip, "On solvability of the matrix equation AX+YB=C over principal ideal domains," Modeling, control and information technologies, 2024, No.7., pp. 264–267.
https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.081

[26] W.E. Roth, "The equation AX – YB = C and AX – XB = C in matrices," Proc. Amer. Math. Soc., 1952, Vol.**97**, No.3., pp. 392–396. https://doi.org/10.1090/S0002-9939-1952-0047598-3

[27] Y. Tian, C. Xia. "On the low-degree solution of the Sylvester matrix polynomial equation," Hindawi J. Math., 2021, **2021,**. Article ID 4612177. https://doi.org/10.1155/2021/4612177

[28] H.K. Wimmer, "Roth's theorems for matrix equations with symmetry constraints," Linear Algebra Appl., 1994, Vol.**199,** pp. 357–362.
https://doi.org/10.1016/0024-3795(94)90358-1

[29] L-M. Xie, Q-W. Wang and Z-H. He, "The generalized hand-eye calibration matrix equation AX-YB=C over dual quaternions," / Comp. Appl. Math., 2025, Vol.**44**, 137.
https://doi.org/10.1007/s40314-025-03102-4

[30] H.K. Wimmer, "The generalized Sylvester equation in polynomial matrices," IEEE Transactions on automatic control, 1996, Vo. **41,** No.9., pp. 1372–1376.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Метод прогнозування на основі усереднення поліноміальної екстраполяційної послідовності

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.102

Юрій Турбал
Кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
turbaly@gmail.com

Маріана Турбал
Кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
Turbal.mariana.1@gmail.com

Олександр Кубай
Кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
o.v.kubai@nuwm.edu.uam

Денис Смірнов
Аспірант,
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
d.a.smirnov@nuwm.edu.ua

Максим Мельничук
Аспірант,
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
m.o.melnychuk@nuwm.edu.ua

Анотація — **У статті пропонується алгоритм, який значно розширить сферу застосування поліноміальних прогнозів. Цей алгоритм базується на процедурі побудови послідовності всіх поліноміальних прогнозів на основі відомих даних та аналізу цих прогнозів. Потім уточнений прогноз будується як середнє арифметичне певної кількості перших елементів послідовності. У статті досліджуються похибки екстраполяції та запропоновано алгоритм знаходження оптимальної кількості елементів послідовності поліноміальних прогнозів, для яких будується усереднення. Числові результати, представлені в статті, демонструють ефективність методики прогнозування на основі усереднення поліноміальних прогнозів. Зокрема, для тестових прикладів відносна похибка становила близько 2%.**

Ключові слова — ***спостереження; прогнозування; екстраполяція; метод; сітка; алгоритм; многочлен; похибка.***

I. Вступ

Наука про дані сьогодні є надзвичайно популярною. Всі звикли говорити про великі дані, однак проблеми, пов'язані з малими даними, є не менш важливими. Однією з фундаментальних проблем в науці про дані є проблема прогнозування. Задачі прогнозування часових рядів є актуальними і сьогодні, незважаючи на наявність великої кількості відомих методів та підходів. Ці задачі тісно пов'язані з екстраполяцією та інтерполяцією функцій.

В той час, коли задачі інтерполяції функцій добре вивчені, існує низка ефективних інтерполяційних методів, проблема екстраполяції залишається в багатох аспектах відкритою. Адже реальні процеси часто мають суттєву стохастичну складову, експериментальні дані можуть бути неповними, обмеженими, спотвореними. Математичні методи, що використовується для побудови прогнозів, обмежені проблемою адекватності математичної моделі, ступенем стохастичності процесу, що досліджується. Адже стохастичний процес неможливо спрогнозувати при одному експерименті взагалі і тоді говорять про певні усереднені характеристики.

На практиці часто виникають невеликі часові ряди спостережень для яких проблематично визначити адекватну математичну модель, зокрема, через недостатність інформації. Це стосується, наприклад, різноманітних рядів економічної динаміки, коли ступінь стохастичності залежить від інтервалів між спостереженнями: при великих інтервалах процес можна розглядати як стохастичний, при малих – умовно детермінований, якщо враховувати певну інерційність економічних систем. При цьому задача прогнозування таких процесів часто є критично важливою, особливо якщо

це стосується військової галузі. Таким чином, дослідження, присвячені екстраполяційним задачам є актуальними.

II. Огляд літературних джерел

У контексті короткострокового прогнозування детермінованих процесів актуальною є задача екстраполяції функції, заданої таблично. Серед численних методів екстраполяції особливе місце посідають підходи, що ґрунтуються на використанні інтерполяційних многочленів. Проблематика такого типу задач висвітлена у працях [1] - [5].

Питання наближення неперервних і диференційовних функцій многочленами є одним із класичних у теорії апроксимації. Зокрема, відомі теореми Вейєрштрасса, Дзядика та Тімана [1] доводять можливість наближення будь-якої неперервної функції на скінченному інтервалі многочленом із довільно малою похибкою. На основі цих результатів сформульовано підхід до екстраполяції, який часто позначають принципом “добре проінтерполюй — обережно проекстраполюй”.

У межах такого підходу найчастіше застосовуються інтерполяційні многочлени Ньютона другого виду [2] або узагальнені інтерполяційні многочлени, побудовані на базі систем функцій Чебишева [3], [4], зокрема експоненційних і тригонометричних. Окрім цього, значного поширення набули методи екстраполяції, що базуються на аналізі трендів [5], радіальних базисних функціях, сплайнах (кубічних, B-сплайнах) та кривих типу Безьє, які не проходять безпосередньо через точки інтерполяції.

У сучасних дослідженнях активно застосовуються також статистичні та імовірнісні підходи [5], серед яких варто відзначити геометричні методи, що враховують середньоарифметичні співвідношення елементів часових рядів, а також байєсівські процедури прогнозування. Вагоме місце у задачах прогнозування займають методи машинного навчання та штучних нейронних мереж.

Варто зазначити, що більшість відомих методів ґрунтується на певному припущенні щодо типу функції, яка описує поведінку процесу. Очевидно, що для будь-якої множини точок існує безліч кривих, які можуть точно проходити через них або наближати їх із певною точністю. Тому складно обґрунтовано стверджувати, що саме одна з таких кривих є істинним законом, який описує досліджуване явище та забезпечує достовірне прогнозування його подальшої еволюції.

Практичні результати свідчать, що екстраполяція на основі многочленів часто демонструє низьку ефективність, особливо за межами інтервалу інтерполяції. Це зумовлює необхідність пошуку способів удосконалення поліноміальних методів та їх поєднання з іншими підходами. Метою даного дослідження є спроба інтеграції методів поліноміального прогнозування зі статистичними підходами та технологіями інтелектуального аналізу даних, що дозволяє підвищити точність прогнозів і розширити практичні можливості класичних методів екстраполяції.

III. Алгоритм прогнозування

Розглянемо спочатку декілька необхідних допоміжних тверджень .

Твердження 1. Нехай маємо рівномірну сітку з кроком Δ, відомі значення деякої функції $f_i = f(i\Delta), i = n, n-1, \dots, n-m+1$. Тоді прогнозне значення функції в точці $n+1$, побудоване на основі інтерполяційного многочлена степеня $m-1$, може бути знайдене на основі співвідношення:

$$f_{n+1}^m = \sum_{k=1}^m (-1)^{k-1} C_m^k f_{n-k+1} \quad (1)$$

Це твердження доведене в роботі [1].

Твердження 2. Має місце співвідношення:

$$\sum_{i=1}^{m-1} f_{n+1}^i = \sum_{k=2}^m (-1)^k C_m^k f_{n-k+2} \quad (2)$$

Розглянемо доведення. Маємо:

$$\sum_{k=2}^m (-1)^k C_m^k f_{n-k+2} = |l = k-1| = \\ = \sum_{l=1}^{m-1} (-1)^{l+1} C_m^{l+1} f_{n-l+1},$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} f_{n+1}^i = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{l=1}^{i} (-1)^{l-1} C_i^l f_{n-l+1} = \\ = \sum_{l=1}^{m-1} f_{n-l+1} (-1)^{l-1} \sum_{i=l}^{m-1} C_i^l.$$

Скористаємося відомим комбінаторним співвідношенням:

$$\sum_{k=i}^{n} C_k^i = C_{n+1}^{i+1}, i = 0,1,2, \dots$$

Тоді виконується рівність:

$$\sum_{i=l}^{m-1} C_i^l = C_m^{l+1}.$$

Отже,

$$\sum_{l=1}^{m-1} f_{n-l+1} (-1)^{l-1} \sum_{i=l}^{m-1} C_i^l = \sum_{l=1}^{m-1} f_{n-l+1} (-1)^{l-1} C_m^{l+1} \\ = \sum_{l=1}^{m-1} f_{n-l+1} (-1)^{l+1} C_m^{l+1}$$

Отримали співвідношення (2).

Розглянемо детальніше формулу (1) та виконаємо серію перетворень:

$$f_{n+1}^m = \sum_{k=1}^m (-1)^{k-1} C_m^k f_{n-k+1} = \\ = C_m^1 f_n + \sum_{k=2}^m (-1)^{k-1} C_m^k f_{n-k+1} = \\ = C_m^1 f_n + \sum_{k=2}^m (-1)^{k-1} C_m^k f_{n-k+1} - \\ - \sum_{k=2}^m (-1)^k C_m^k f_{n-k+2} + \sum_{k=2}^m (-1)^k C_m^k f_{n-k+2} = \\ = C_m^1 f_n + \sum_{k=2}^m (-1)^{k-1} C_m^k (f_{n-k+1} - f_{n-k+2}) - \\ - \sum_{k=2}^m (-1)^k C_m^k f_{n-k+2} = \\ = C_m^1 f_n + \sum_{k=2}^m (-1)^{k-1} C_m^k (f_{n-k+1} - f_{n-k+2}) - \sum_{i=1}^{m-1} f_{n+1}^i.$$

Звідси отримуємо:

$$0 = C_m^1 f_n + \sum_{k=2}^{m}(-1)^{k-1}C_m^k(f_{n-k+1} - f_{n-k+2}) - \\ - \sum_{i=1}^{m} f_{n+1}^i,$$

$$\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} f_{n+1}^i = f_n + \\ + \frac{1}{m}\sum_{k=2}^{m}(-1)^{k-1}C_m^k(f_{n-k+1} - f_{n-k+2}). \quad (3)$$

Будемо шукати невідоме прогнозне значення f_{n+1} у вигляді:

$$f_{n+1} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} f_{n+1}^i + \varepsilon(m) \quad (4)$$

Тоді з врахуванням (4) з співвідношення (3) отримуємо:

$$f_{n+1} - \varepsilon(m) = f_n + \\ + \frac{1}{m}\sum_{k=2}^{m}(-1)^{k-1}C_m^k(f_{n-k+1} - f_{n-k+2}),$$

$$f_{n+1} - f_n - \varepsilon(m) = \\ = \frac{1}{m}\sum_{k=2}^{m}(-1)^{k}C_m^k(f_{n-k+2} - f_{n-k+1}),$$

$$\varepsilon(m) = \sum_{k=1}^{m}(-1)^{k-1}C_m^k(f_{n-k+2} - f_{n-k+1}),$$

$$\varepsilon(m) = \sum_{k=1}^{m}(-1)^{k-1}C_m^k f_{n-k+2} - \\ - \sum_{k=1}^{m}(-1)^{k-1}C_m^k f_{n-k+1}\,. \quad (5)$$

З урахуванням (1) умову (5) можемо записати у вигляді:

$$\varepsilon(m) = f_{n+2}^m - f_{n+1}^m\,. \quad (6)$$

Співвідношення (6) є фактично необхідною умовою виконання (4).

Нехай має місце умова (6). Тоді з умови (5) отримуємо співвідношення:

$$f_{n+1} = \varepsilon(m) + f_n \\ + \frac{1}{m}\sum_{k=2}^{m}(-1)^{k-1}C_m^k(f_{n-k+1} \\ - f_{n-k+2})$$

З урахуванням тотожності (5) отримуємо умову (6). Отже, виконання рівності (6) є необхідною та достатньою для виконання співвідношення (4).

Бачимо, що похибка при знаходженні прогнозного значення як середнього арифметичного m перших членів послідовності поліноміальних прогнозів визначається співвідношенням (6). Очевидно, нас цікавитиме знаходження такої кількості членів послідовності поліноміадьних прогнозів, при якій відповідна похибка є мінімальною.

Тоді, можемо запропонувати наступний алгоритм екстраполяції, який включає визначення оптимального значення кількості елементів ряду поліноміальних прогнозів, в основі якого можемо покласти ідею мінімізації похибки екстраполяції:

1. Вибираємо послідовно значення $m = 1,2,\dots,n$.
2. Знаходимо значення $f_{n+1}^i = \sum_{k=1}^{i}(-1)^{k-1}C_i^k f_{n-k+1}$, $i = \overline{1,m}$.
3. Знаходимо прогнозне значення $\hat{f}_{n+1}^m$ в точці $n+1$ за формулою: $\hat{f}_{n+1}^m = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} f_{n+1}^i$.
4. Знаходимо прогнозне значення $\hat{f}_{n+2}^m$ в точці $n+2$ за формулою: $\hat{f}_{n+2}^m = \sum_{k=2}^{m}(-1)^{k-1}C_m^k f_{n-k+2} + m\hat{f}_{n+1}^m$.
5. Знаходимо відхилення $\Delta_m = \left|\hat{f}_{n+2} - \hat{f}_{n+1}\right|$.
6. Знаходимо оптимальне значення m^* з умови мінімізації відхилень: $m^* = \underset{m\in\{1,2,..,n\}}{\operatorname{argmin}}\ \Delta_m$.

IV. Чисельні результати

Розглянемо курс біткоїна в доларах США за період з 9 вересня 2025 р. по 4 жовтня 2025 р.: 111718; 111504; 114409; 115269; 115966; 115717; 115537; 115383; 116474; 117656; 117005; 115543; 115706; 114688; 112387; 111792; 109653; 109648; 109587; 111908; 114443; 114193; 118786; 122226; 122324.

Відповідний графік зображений на Рис.1

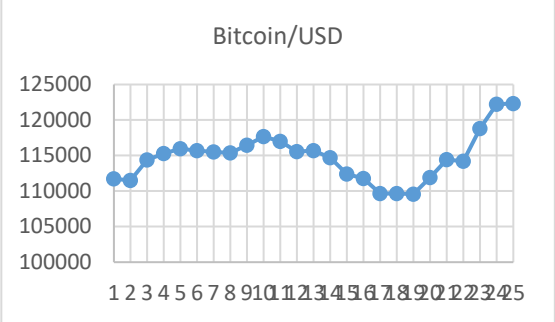


Рис.1. Графік курсу біткоїна

Будемо послідовно виконувати кроки алгоритму. В таблиці 1 наведено числові результати – значення послідовності поліноміальних прогнозів, обрахунок прогнозного значення як середнього арифметичного 6 елементів послідовності, побудову прогнозного значення в точці *n+2*. При цьому використали многочлени до 18 степеня включно.

ТАБЛИЦЯ I. Визначення прогнозних значень

$\hat{f}_{n+1}$	$\hat{f}_{n+2}$	степінь	$\left\|\hat{f}_{n+2} - \hat{f}_{n+1}\right\|$
122422	124564	2	2142
119080	125586	3	6506
116891	129950	4	13059
120698	136503	5	15805
138129	139249	6	1120
179811	124564	7	-55247
257202	68197	8	-189005
377985	-65561	9	-443546
536834	-320102	10	-856936
695684	-733492	11	-1429176
740709	-1305732	12	-2046441
390045	-1922997	13	-2313042
-996202	-2189598	14	-1193396
-4784337	-1069952	15	3714385

-13728892	3837829	16	17566721
-33057292	17690165	17	50747457
-72059265	50870901	18	1,23E+08

Відоме значення курсу біткоїна 5 жовтня 2025 р., яке рівне 123007 USD. Прогнозне значення 123444 знайдено як середнє арифметичне 5 перших значень послідовності поліноміальних прогнозів. При цьому величина Δ_5=1120.

Відповідні чисельні результати для іншої кількості точок (Таблиці 2-5) наведені нижче. У верхньому лівому куточку кожної таблиці наведено прогнозне зхначення як відповідне середнє арифметичне.

ТАБЛИЦЯ II.

119464,33

$\hat{f}_{n+1}$	$\hat{f}_{n+2}$	степінь	$\lvert\hat{f}_{n+2}-\hat{f}_{n+1}\rvert$
122422	116604,7	2	-5817,33
119080	113647	3	-5433
116891	114031,3	4	-2859,67

Δ_3=2859

ТАБЛИЦЯ III.

119772,75

$\hat{f}_{n+1}$	$\hat{f}_{n+2}$	степінь	$\lvert\hat{f}_{n+2}-\hat{f}_{n+1}\rvert$
122422	117221,5	2	-5200,5
119080	114572,3	3	-4507,75
116891	115265	4	-1626
120698	118146,8	5	-2551,25

Δ_4=2551

ТАБЛИЦЯ IV.

132838,5

$\hat{f}_{n+1}$	$\hat{f}_{n+2}$	степінь	$\lvert\hat{f}_{n+2}-\hat{f}_{n+1}\rvert$
122422	143353	2	20931
119080	153769,5	3	34689,5
116891	167528	4	50637
120698	183475,5	5	62777,5
138129	195616	6	57487
179811	190325,5	7	10514,5

Δ_6=10514

ТАБЛИЦЯ V.

150604,71

$\hat{f}_{n+1}$	$\hat{f}_{n+2}$	степінь	$\lvert\hat{f}_{n+2}-\hat{f}_{n+1}\rvert$
122422	178885,4	2	56463,43
119080	207068,1	3	87988,14
116891	238592,9	4	121701,9
120698	272306,6	5	151608,6
138129	302213,3	6	164084,3
179811	314689	7	134878
257202	285482,7	8	28280,71

Δ_7=28280,

Бачимо, що мінімальне значення відхилення, яке визначене у алгоритмі, досягається саме при m=5.

V. ВИСНОВКИ

Таким чином, в роботі отримано низку важливих результатів, які становлять теоретичну основу методу прогнозування, який пропонується. Фактично отримано необхідну та достатнью умову для представлення прогнозного значення як середнього арифметичного підпослідовності поліноміальних прогнозів. Відповідна умова покладена в основі алгоритму екстраполяції, який містить підпроцедуру для знаходження кількості елементів послідовності поліноміальних прогнозів, для яких необхідно знаходити середнє арифметичне та будувати остаточний прогноз.

Чисельні результати, які наведено у роботі, підтверджують ефективність алгоритму екстраполяції. Зауважимо, що в прикладі використано дані фактично випадкового процесу. Однак, метод дав досить пристойний результат, що підтверджує можливість широкого його застосування.

[1] Y. Turbal, A. Bomba, M. Turbal, B. Turbal, D. Smirnov «Forecasting Algorithm Based on Intellectual Analysis of Polynomial Extrapolation», Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 2025, 244, pp. 98–113.

[2] A.S. Kostinsky «On the principles of a spline extrapolation concerning geophysical data. » Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, v.2, 111-117., 2014.

[3] Z. Fu, Y. Zhan, R.-J. Yang, Z. Xi, L Shi «A Bayesian Inference based Model Interpolation and Extrapolation.» SAE Int. J. Mater. Manf. 5. 2 , 2012,357-364.–350.

[4] J. I. Monroe, H. W. Hatch, N. A. Mahynski, M. S. Shell, V. K. Shen, «Extrapolation and interpolation strategies for efficiently estimating structural observables as a function of temperature and density. » J. Chem. Phys. 153,2020, 144101.

[5] N. P. Bakas «Numerical Solution for the Extrapolation of Analytic functions. » Problem of Analytic Functions/Research. 2019.

[6] S. Makridakis, N. Bakas «Forecasting and uncertainty: a survey.» Risk and Decision Analysis, 6(1) , 2016, 37–64.

[7] N. Demiris, D. Lunn, L.D. Sharples «Survival extrapolation using the poly-Weibull model. » Stat Methods Med Res, 24(2), 2015, 287–301.

[8] L-Y. Wang, W-C. Lee « One-step extrapolation of the prediction performance of a gene signature derived from a small study.» BMJ Open, 5:e007170, 2014 .

[9] Y. Turbal, G. Shlikhta, M. Turbal, B.Turbal «The polynomial forecasr improvement based on the algorithm of optimal polynomial degree selection», Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 2023, 5(4(125)), pp. 34–42

[10] Y. Turbal, M. Turbal, A. Bomba, A.A.H. Driwi, N. Kunanets «Modification of the “Piramidal” algorithm of the small time series forecasting. » Ce/ur Workshop Proceedings, 2021, 2853, pp. 223–232.

[11] Y. Turbal, M. Turbal, A.A. Driwi, S. Al Shukri «On the equivalence of the forecast value construction in the “pyramidal” extrapolation method and cubic forecast. » MCIT , 2020, 67–70.

[12] R. J. Hyndman, A. V. Kostenko, «Minimum sample size requirements for seasonal forecasting model. » FORESIGHT, 2007, Issue 6.

[13] S. R. Santanu «Numerical analysis whith algorithms and programming » , CRC Press, 2016, 675 p.

Про вплив інтегральних умов спряження на просідання поверхні пористого середовища в умовах його неізотермічної консолідації: математична модель та схема її числового розв'язання

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.103

Оксана Уляньчук-Мартинюк
Національний університет водного господарства
та природокористування,
м. Рівне, Україна
o.v.ulianchukmartyniuk@nuwm.edu.ua

Анотація - Сформовано математичну модель неізотермічної фільтраційної консолідації неоднорідного масиву ґрунту з урахуванням зміни розмірів області в процесі ущільнення. Неоднорідність в роботі розглянуто з точки зору наявності тонких включень (геобар'єрів), фізико-механічні характеристики яких відрізняються від аналогічних характеристик основного ґрунту. Геобар'єри, які піддаються впливу неізотермічних умов, є складовою частиною сховищ відходів. Зміна їх (геобар'єрів) гідромеханічних та термічних властивостей, так само як і явища термічного осмосу, вимагає модифікації як рівнянь в математичній моделі, так і умов спряження. З математичної точки зору сформована математична модель описується однофазною задачею Стефана і своєю складовою містить кінематичну граничну умову на верхній рухомій межі. Зміна розмірів області дослідження в задачі фізично обумовлюється зміною об'єму пор пористого середовища в процесі розсіювання надлишкових напорів. Якщо проникність геобар'єра є нелінійно залежною від температурного фактору, то це впливає на динаміку консолідаційних процесів і, відповідно, - на значення просідань. Запропоновано схеми скінченноелементних розв'язків початково-крайової задачі для системи нелінійних параболічних рівнянь в неоднорідній області з інтегральною умовою спряження.

Ключові слова - неізотермічна консолідація, просідання, умова спряження, кінематична гранична умова, метод скінченних елементів

I. ВСТУП

Звалища відходів стали невід'ємними елементами життєдіяльності людей на планеті Земля [1]. Одним із інженерних елементів сховищ відходів є геобар'єри [2]. В результаті біодеградаційних процесів в сховищах відходів відбувається виділення теплової енергії [3, 4]. Тому постає необхідність урахування неізотермічних впливів як на консолідацію пористого середовища тіла сховища відходів, так і на фільтраційні характеристики геобар'єрів.

Одне з основних питань впливу сховищ відходів на навколишнє середовище – це поширення шкідливих речовин шляхом їх фільтрації через геобар'єри в навколишнє середовище. Тому фактори, які впливають на параметри фільтрації через геобар'єри мають бути прийняті до уваги в прогнозних математичних моделях. З математичної точки зору існуючий факт теплового впливу вимагає модифікації умов спряження на тонких геобар'єрах з урахуванням неізотермічних та взаємопов'язаних нелінійних ефектів. Такі модифікації наведені наприклад в роботах [5-11].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ У ФІЗИЧНІЙ ОБЛАСТІ

Розглянемо масив пористого середовища загальною товщиною $l = l(t)$, який складається із двох підобластей Ω_1 та Ω_2. Причому $\Omega_1 \cap \Omega_2 = \emptyset$. Область $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ вважаємо неоднорідною. Під неоднорідністю будемо розуміти наявність межі контакту $\omega = \overline{\Omega_1} \cap \overline{\Omega_2}$, яка, з фізичної точки зору, є тонким включенням товщиною d третього матеріалу. З математичної точки зору товщиною самого включення нехтують і сама величина d фігурує лише в так званих умовах спряження неідеального контакту для невідомих функцій.

Дослідимо процес консолідації даного повністю насиченого пористого середовища в області $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ в умовах впливу температурного фактору. Це означає, що неоднорідний шар ґрунту – це основа сховища відходів, а тонке включення – це геобар'єр. Консолідація ґрунту є наслідком прикладання зовнішнього навантаження у вигляді твердих відходів у сховищі. В результаті хімічних реакцій у

сховищі відбувається виділення теплової енергії. Отже, невідомими будуть функції напорів $h(x,t)$ та температури $T(x,t)$,$x \in \Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2, t \geq 0$.

III. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ В ОБЛАСТІ З ТОНКИМ ВКЛЮЧЕННЯМ

Взаємозв'язаний процес зміни напорів та температури повністю насиченого неоднорідного масиву пористого середовища в одновимірному випадку описується наступною крайовою задачею:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1+e}{\gamma a}\frac{\partial}{\partial x}\left(k(h,T)\frac{\partial h}{\partial x} + \mu(h)\frac{\partial T}{\partial x}\right), \quad x \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t > 0, \quad (1)$$

$$h(x,t)|_{x=0} = \overline{h}_0(t), t \geq 0; \quad (2)$$

$$u(x,t)|_{x=l} = \left(-k(h,T)\frac{\partial h}{\partial x} - \mu(h)\frac{\partial T}{\partial x}\right)\Big|_{x=l(t)} = 0, \quad t \geq 0; \quad (3)$$

$$h(x,0) = h_0(x), x \in \overline{\Omega}_1 \cup \overline{\Omega}_2; \quad (4)$$

$$c_s(h)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(h)\frac{\partial T}{\partial x}\right) - \rho_w c_w u(h,T)\frac{\partial T}{\partial x}, \quad x \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t > 0; \quad (5)$$

$$T(x,t)|_{x=0} = \overline{T}_0(t), t \geq 0; \quad (6)$$

$$q_T(x,t)|_{x=l} = -\lambda(h)\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=l(t)} = 0, t \geq 0; \quad (7)$$

$$T(x,0) = T_0(x), x \in \overline{\Omega}_1 \cup \overline{\Omega}_2; \quad (8)$$

$$u^{\pm}|_{x=\xi} = -\frac{[h]}{\int_0^d \frac{dx}{k_\omega(h,T)}} - \frac{[T]}{\int_0^d \frac{dx}{\mu_\omega(h)}}; \quad (9)$$

$$q_T^{\pm}\big|_{x=\xi} = -\frac{[T]}{\int_0^d \frac{dx}{\lambda_\omega(h)}}; \quad (10)$$

$$\frac{dl(t)}{dt} = -\int_0^{l(t)} \frac{\partial u}{\partial x}dz; \quad (11)$$

$$l(t)|_{t=0} = l_0 > 0. \quad (12)$$

Тут: $\Omega_1 = (0;\xi)$, $\Omega_2 = (\xi;l)$, $0 < \xi < l(t)$; $\overline{h}_0(t)$, $h_0(x)$, $\overline{T}_0(t)$, $T_0(x)$, - відомі функції; a - коефіцієнт стискуваності ґрунту; h - напір; k, k_ω - коефіцієнти фільтрації основного ґрунту та ґрунту включення відповідно; λ, λ_ω - коефіцієнти теплопровідності основного ґрунту та ґрунту включення відповідно; μ, μ_ω - коефіцієнти термічного осмосу основного ґрунту та ґрунту включення відповідно; u - швидкість фільтрації; e – коефіцієнт пористості ґрунту, причому $e = \frac{\sigma}{1-\sigma}$, де σ - пористість ґрунту; q_T - потік теплової енергії; $u^{\pm}, q_T^{\pm}$ – значення швидкостей фільтрації та потоків при $x = \xi - 0$ та $x = \xi + 0$ відповідно; $[h] = h^+ - h^-$, $[T] = T^+ - T^-$ - стрибки напорів та температури на тонкому включенні; $c_s = \rho_w c_w \sigma + \rho_{solid} c_{solid}(1-\sigma)$ – коефіцієнт об'ємної теплоємності ґрунту; ρ_w, ρ_{solid} – густини порової рідини та твердих частинок ґрунту; c_w , c_{solid} – питомі теплоємності порової рідини та твердих частинок ґрунту.

Рівняння (1) є рівнянням фільтраційної консолідації в умовах впливу температури та наявності термоосмотичних ефектів [12, 13]. Умови спряження (9), (10) відрізняються від класичних і враховують залежності коефіцієнта фільтрації геобар'єра від пористості та температури, наявність термічного осмосу, а також залежності коефіцієнта теплопровідності від пористості.

Аналогічно [6], нехай H_0 – простір функцій $s(x)$ які на кожній з областей Ω_i належать простору Соболєва $W_2^1(\Omega_i)$, $i = 1,2$, причому задовольняють умову

$$s(x)|_{x=0} = 0.$$

Нехай $h(x,t)$, $T(x,t)$ – класичний розв'язок початково-крайової задачі (1)-(12). Візьмемо $s(x) \in H_0$. Домножимо рівняння (1) та початкову умову (4) на $s(x)$. Аналогічно - рівняння (5) та початкову умову (8). Інтегруючи їх на відрізку $[0;l]$ та враховуючи умови спряження (9), (10), отримаємо

$$\int_0^l \frac{\gamma a}{1+e}\frac{\partial h}{\partial t}s(x)dx + \int_0^l k(h,T)\frac{\partial h}{\partial x}\frac{ds}{dx}dx + \int_0^l \mu(h)\frac{\partial T}{\partial x}\frac{ds}{dx}dx + \frac{[h][s]}{\int_0^d \frac{dx}{k_\omega(h,T)}} + \frac{[T][s]}{\int_0^d \frac{dx}{\mu_\omega(h)}} = 0, \quad (13)$$

$$\int_0^l h(x,0)s(x)dx = \int_0^l h_0(x)s(x)dx, \quad (14)$$

$$\int_0^l c_s\frac{\partial T}{\partial t}s(x)dx + \int_0^l \lambda(h)\frac{\partial T}{\partial x}\frac{ds}{dx}dx + \int_0^l \rho_w c_w u\frac{\partial T}{\partial x}s(x)dx + \frac{[T][s]}{\int_0^d \frac{dx}{\lambda_\omega(h)}} = 0, \quad (15)$$

$$\int_0^l h(x,0)s(x)dx = \int_0^l h_0(x)s(x)dx. \quad (16)$$

Отже, якщо $h(x,t)$, $T(x,t)$ є класичним розв'язком початково-крайової задачі (1)-(12), то $h(x,t), T(x,t)$ – розв'язок задачі (13)-(16) в слабкій постановці.

Нехай H – простір функцій $v(x,t)$ які інтегровані з квадратом разом зі своїми першими похідними $\frac{\partial v}{\partial t}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$ на кожному з інтервалів $(0;\xi)$, $(\xi;l)$, $\forall t \in (0;\mathcal{T}]$, $\mathcal{T} > 0$, причому вони задовольняють однорідні граничні умови першого роду

$$v(x,t)|_{x=0} = 0, \qquad t \geq 0.$$

Означення 1. Функції $h(x,t) \in H$, $T(x,t) \in H$, котрі для будь-якої $s(x) \in H_0$ задовольняють інтегральним співвідношенням (13)-(16) називаються узагальненим розв'язком початково-крайової задачі (1)–(12).

VI. НАБЛИЖЕНИЙ УЗАГАЛЬНЕНИЙ РОЗВ'ЯЗОК: ЙОГО ІСНУВАННЯ ТА ЄДИНІСТЬ

Наближений узагальнений розв'язок початково-крайової задачі (1)-(12) будемо шукати у вигляді

$$\hat{h}(x,t) = \sum_{i=1}^{N} h_i(t)\varphi_i(x),$$

$$\hat{T}(x,t) = \sum_{i=1}^{N} T_i(t)\varphi_i(x), \qquad (17)$$

де $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^{N}$ - базис скінченновимірного підпростору $M_0 \subset H_0$; $h_i(t)$, $T_i(t)$, $i = \overline{1,N}$ - невідомі коефіцієнти, які залежать лише від часу.

Сукупність функцій, які можна подати у вигляді (17), породжують скінченновимірний підпростір $M \subset H$.

Означення 2. Наближеним узагальненим розв'язком початково-крайової задачі (1)-(12) називається пара функцій $\hat{h}(x,t) \in M$, $\hat{T}(x,t) \in M$ які для довільної функції $S(x) \in M_0$ задовольняють інтегральним співвідношенням

$$\int_0^l \frac{\gamma a}{1+e}\frac{\partial \hat{h}}{\partial t}S(x)dx + \int_0^l k(\hat{h},\hat{T})\frac{\partial \hat{h}}{\partial x}\frac{dS}{dx}dx + \int_0^l \mu(\hat{h})\frac{\partial \hat{T}}{\partial x}\frac{dS}{dx}dx + \frac{[\hat{h}][S]}{\int_0^d \frac{dx}{k_\omega(\hat{h},\hat{T})}} + \frac{[\hat{T}][S]}{\int_0^d \frac{dx}{\mu_\omega(\hat{h})}} = 0, \quad (18)$$

$$\int_0^l \hat{h}(x,0)S(x)dx = \int_0^l h_0(x)S(x)dx, \quad (19)$$

$$\int_0^l c_s\frac{\partial \hat{T}}{\partial t}S(x)dx + \int_0^l \lambda(\hat{h})\frac{\partial \hat{T}}{\partial x}\frac{dS}{dx}dx + \int_0^l \rho_w c_w u\frac{\partial \hat{T}}{\partial x}S(x)dx + \frac{[\hat{T}][S]}{\int_0^d \frac{dx}{\lambda_\omega(\hat{h})}} = 0, \quad (20)$$

$$\int_0^l \hat{T}(x,0)S(x)dx = \int_0^l T_0(x)S(x)dx. \quad (21)$$

Далі із слабкого формулювання (18)–(21) задачі (1)–(12), враховуючи (17) (покладаючи функцію $S(x)$ рівною кожній базисній функції $\varphi_i(x)$, $i = \overline{1,N}$), отримаємо задачу Коші для системи нелінійних диференціальних рівнянь

$$\mathbf{M_1}(\mathbf{H})\frac{d\mathbf{H}}{dt} + \mathbf{L_1}(\mathbf{H},\mathbf{T})\mathbf{H}(\boldsymbol{t}) + \mathbf{L_{12}}(\mathbf{H})\mathbf{T}(\boldsymbol{t}) = \mathbf{0}, \quad (22)$$

$$\widetilde{\mathbf{M}}_\mathbf{1}\mathbf{H}^{(\mathbf{0})} = \widetilde{\mathbf{F}}_\mathbf{1}, \quad (23)$$

$$\mathbf{M_2}(\mathbf{H})\frac{d\mathbf{T}}{dt} + \mathbf{L_2}(\mathbf{H},\mathbf{T})\mathbf{T}(\boldsymbol{t}) = \mathbf{0}, \quad (24)$$

$$\widetilde{\mathbf{M}}_\mathbf{2}\mathbf{T}^{(\mathbf{0})} = \widetilde{\mathbf{F}}_\mathbf{2}, \quad (25)$$

Де

$\widetilde{\mathbf{F}}_k = \left(\tilde{f}_i^{(k)}\right)_{i=1}^{N}$, $\widetilde{\mathbf{M}}_k = \left(\tilde{m}_{ij}^{(k)}\right)_{i,j=1}^{N}$, $\mathbf{M}_k = \left(m_{ij}^{(k)}\right)_{i,j=1}^{N}$, $\mathbf{L}_k = \left(l_{ij}^{(k)}\right)_{i,j=1}^{N}$, $k = 1,2$; $\mathbf{L}_{12} = \left(l_{ij}^{(12)}\right)_{i,j=1}^{N}$, $\tilde{m}_{ij}^{(k)} = \int_0^l \varphi_i\varphi_j dx$, $\tilde{f}_i^{(1)} = \int_0^0 h_0\,\varphi_i dx$, $\tilde{f}_i^{(2)} = \int_0^0 T_0\,\varphi_i dx$, $\mathbf{H} = \left(h_i(t)\right)_{i=1}^{N}$, $\mathbf{T} = \left(T_i(t)\right)_{i=1}^{N}$, $\mathbf{H}^{(\mathbf{0})} = \left(h_i(0)\right)_{i=1}^{N}$, $\mathbf{T}^{(\mathbf{0})} = \left(T_i(0)\right)_{i=1}^{N}$, $m_{ij}^{(1)} = \int_0^l \frac{\gamma a}{1+e}\varphi_i\varphi_j dx$,

$$l_{ij}^{(1)} = \int_0^l k(\hat{h},\hat{T})\frac{d\varphi_i}{dx}\frac{d\varphi_j}{dx}dx + \frac{[\varphi_i][\varphi_j]}{\int_0^d \frac{dx}{k_\omega(\hat{h},\hat{T})}},$$

$$l_{ij}^{(12)} = \int_0^l \mu(\hat{h})\frac{d\varphi_i}{dx}\frac{d\varphi_j}{dx}dx + \frac{[\varphi_i][\varphi_j]}{\int_0^d \frac{dx}{\mu_\omega(\hat{h})}},$$

$$m_{ij}^{(2)} = \int_0^l c_s\varphi_i\varphi_j dx,$$

$$l_{ij}^{(2)} = \int_0^l \lambda(\hat{h})\frac{d\varphi_i}{dx}\frac{d\varphi_j}{dx}dx + \int_0^l \rho_w c_w u\frac{d\varphi_j}{dx}\varphi_i dx + \frac{[\varphi_i][\varphi_j]}{\int_0^d \frac{dx}{\lambda_\omega(\hat{h})}}.$$

Задача (22)-(25) є задачею Коші для системи нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку. Відшукання її розв'язку теж вимагає застосування відповідних схем дискретизації. В [6] обґрунтовано застосування схеми Кранка-Ніколсона

$$\mathbf{M_1}\left(\mathbf{H}^{(j+1/2)}\right)\frac{\mathbf{H}^{(j+1)} - \mathbf{H}^{(j)}}{\tau} + \mathbf{L_1}\left(\mathbf{H}^{(j+1/2)},\mathbf{T}^{(j+1/2)}\right)\mathbf{H}^{(j+1/2)} + \mathbf{L_{12}}\left(\mathbf{H}^{(j+1/2)}\right)\mathbf{T}^{(j+1/2)} = \mathbf{0},$$

$$\mathbf{M_2}\left(\mathbf{H}^{(j+1/2)}\right)\frac{\mathbf{T}^{(j+1)} - \mathbf{T}^{(j)}}{\tau} + \mathbf{L_2}\left(\mathbf{H}^{(j+1/2)},\mathbf{T}^{(j+1/2)}\right)\mathbf{T}^{(j+1/2)} = \mathbf{0}, j = 0,1,2,\dots,m_\tau - 1.$$

Тут часовий відрізок $[0,\mathcal{T}]$ розбитий на m_τ рівних частин з кроком $\tau = \frac{\mathcal{T}}{m_\tau}$; $\mathbf{H}^{(j)}$, $\mathbf{T}^{(j)}$ - наближений розв'язок задачі Коші при $t = j\tau$, $\mathbf{H}^{(j+1/2)} = \frac{1}{2}\left(\mathbf{H}^{(j+1)} + \mathbf{H}^{(j)}\right)$, $\mathbf{T}^{(j+1/2)} = \frac{1}{2}\left(\mathbf{T}^{(j+1)} + \mathbf{T}^{(j)}\right)$. Також введемо наступні позначення: $h^{(j)}, T^{(j)}$ - класичний розв'язок початково-крайової задачі (1)-(10) при $t = j\tau$; $\hat{h}^{(j)}, \hat{T}^{(j)}$ - наближений узагальнений розв'язок початково-крайової задачі (1)-(10) при $t = j\tau$; $\phi^{(j+1/2)} = \frac{1}{2}(\phi^{(j+1)} + \phi^{(j)})$; $z_h^{(j)} = h^{(j)} - \hat{h}^{(j)}$, $z_T^{(j)} = T^{(j)} - \hat{T}^{(j)}$.

Однак практична реалізація схеми Кранка-Ніколсона стосовно нелінійної задачі Коші (22)-(25) вимагає застосування ітерацій. Замість схеми Кранка-Ніколсона можна використати схему предиктор-коректор [6]. З точки зору простоти практичної реалізації добре зарекомендувала себе повністю неявна лінеаризована різницева схема [12, 13].

V. АПРОКСИМАЦІЯ КІНЕМАТИЧНОЇ ГРАНИЧНОЇ УМОВИ

Умова (11) не зручна безпосередньо для числового обрахунку просідань поверхні ґрунту. Тому, аналогічно до [5], в (11) підставимо швидкість фільтрації, визначену згідно закону фільтрації

$$u = -k(h,T)\frac{\partial h}{\partial x} - \mu(h)\frac{\partial T}{\partial x}.$$

Маємо

$$\frac{dl(t)}{dt} = \int_0^{l(t)} \frac{\partial}{\partial x}\left(k(h,T)\frac{\partial h}{\partial x} + \mu(h)\frac{\partial T}{\partial x}\right)dz.$$

Далі, використовуючи рівняння (1), з вищенаведеної рівності маємо

$$\frac{dl(t)}{dt} = \int_0^{l(t)} \frac{\gamma a}{1+e}\frac{\partial h}{\partial t}dz. \qquad (26)$$

Застосовуючи до (26) дискретизацію в часі згідно неявної різницевої схеми, отримаємо

$$\frac{l^{(j+1)} - l^{(j)}}{\tau} = \int_0^{l^{(j)}} \frac{\gamma a}{1+e^{(j+1)}}\frac{h^{(j+1)} - h^{(j)}}{\tau}dz\,, j = 0,1,2,\ldots$$

Звідки

$$l^{(j+1)} = l^{(j)} + \int_0^{l^{(j)}} \frac{\gamma a}{1+e^{(j+1)}}\left(h^{(j+1)} - h^{(j)}\right)dz. \quad (27)$$

Тут $l^{(j+1)} = l\left(t_{j+1}\right)$, $j = 0,1,2,\ldots$ В (27) положення $l^{(j)}$ є відомим, як власне і значення $h^{(j+1)}$, $e^{(j+1)}$ та $h^{(j)}$. Відмітимо, що значення напорів, згідно алгоритму, на часовому шарі $(j+1)$ шукаємо, використовуючи положення верхньої межі $l^{(j)}$. Інтеграл в (27) можна знайти, використовуючи формули числового інтегрування.

VI. ВИСНОВКИ

Таким чином, в роботі сформовано математичну модель неізотермічної фільтраційної консолідації неоднорідного масиву ґрунту з урахуванням зміни розмірів області в процесі ущільнення. Запропоновано схеми скінченноелементних розв'язків початково-крайової задачі для системи нелінійних параболічних рівнянь в неоднорідній області з інтегральною умовою спряження. Наведені теоретичні результати є передумовою для програмної реалізації наведених числових схем та створення відповідного програмного забезпечення з метою прогнозування перебігу досліджуваних процесів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lin Mu, Qiao Wang, Fusheng Zha, Jun Wang, Rumin Xu, Miao Piao (2025). Contaminant transport in a municipal solid waste landfill: On-site assessment and numerical modelling of vertical barrier wall effectiveness, Waste Management, Vol.205, 114978, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114978.
2. Mishra A., Raviteja KVNS, Das S.K., Reddy K.R. (2024). Assessing the sustainability of composite liner systems for municipal solid waste landfills. Journal of Environmental Engineering and Science, 2300067, https://doi.org/10.1680/jenes.23.00067
3. Wang C., Zhang Z., Ma Z., Zhang Y., Zhu H., Lu B., Chen W. (2025). Degradation and Stabilization Degree of Municipal Solid Waste: The Case of Two Landfills in China, Sustainability, 17, 307. https://doi.org/10.3390/su17010307
4. Shostak L. V., Martyniuk P. M. (2024). Mathematical modeling of solid municipal waste landfill surface settlement with regard to organic component biodegradation, Mathematical Modeling and Computing, Vol. 11, No. 4, pp. 1106–1117. https://doi.org/10.23939/mmc2024.04.1106
5. Martyniuk P. M., Michuta O. R., Ulianchuk-Martyniuk O. V. (2024). Numerical modeling of surface subsidence due to compaction of soil with fine inclusions, Mathematical Modeling and Computing, Vol. 11, No. 1, pp. 50–58. https://doi.org/10.23939/mmc2024.01.050
6. Michuta Olha R., Martyniuk Petro M. (2022). Nonlinear Evolutionary Problem of Filtration Consolidation With the Non-Classical Conjugation Condition, Journal of Optimization, Differential Equations and their Applications, 30(1), pp. 71–87 DOI: http://dx.doi.org/10.15421/142203
7. Ulianchuk–Martyniuk, O. V. (2020). Numerical simulation of the effect of semi–permeable properties of clay on the value of concentration jumps of contaminants in a thin geochemical barrier. Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications, 8(1), 91–104.
8. Ulianchuk–Martyniuk O., Michuta O. (2020). Conjugation conditions in the problem of filtering chemical solutions in the case of structural changes to the material and chemical suffusion in the geobarrier. JP Journal of Heat and Mass Transfer, 19(1), 141–154. http://dx.doi.org/10.17654/HM019010141
9. Ulyanchuk-Martyniuk O., Michuta O., Ivanchuk N. (2020). Biocolmatation and the finite element modeling of its influence on changes in the head drop in a geobarrier // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(10-106), pp. 18–26. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210044
10. Ulianchuk-Martyniuk O. V., Michuta O. R., Ivanchuk N. V. (2021). Finite element analysis of the diffusion model of the bioclogging of the geobarrier, Eurasian Journal Of Mathematical and Computer Applications, Volume 9, Issue 4, 100 – 114.
11. Ulianchuk-Martyniuk, O.V., Michuta, O.R. (2020). Numerical Simulation of the Effect of Chemical Osmosis on the Value of the Jumps of Pollution in the Geochemical Barrier. International Journal of Applied Mathematics, 33(6), pp. 1067–1082. https://doi.org/10.12732/ijam.v33i6.8
12. Vlasyuk A.P., Martynyuk P.M. (2010). Numerical solution of three-dimensional problems of filtration consolidation with regard for the influence of technogenic factors by the method of radial basis functions. J Math Sci, 171, 632–648. https://doi.org/10.1007/s10958-010-0163-z
13. Vlasyuk A.P., Martynyuk P.M., Fursovych O.R. (2009). Numerical solution of a one-dimensional problem of filtration consolidation of saline soils in a nonisothermal regime. J Math Sci, 160, 525–535. https://doi.org/10.1007/s10958-009-9518-8

MCIT Modeling, control & information technologies

Індикатори першого порядку для визначення потужності гармонік детермінованих складових вібраційних сигналів

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.104

Роман ХМІЛЬ
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України,
Національний університет "Львівська політехніка"
Львів, Україна
romankhmil0705@gmail.com

Роман ЮЗЕФОВИЧ
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України,
Національний університет "Львівська політехніка"
Львів, Україна
roman.yuzefovych@gmail.com

Євген СБРОДОВ
Національний університет "Запорізька політехніка",
Запоріжжя, Україна
sbrodovev@gmail.com

Олег ЛИЧАК
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
olehlychak2003@yahoo.com

Ігор ЯВОРСЬКИЙ
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща
ihor.yavorskyj@gmail.com, javor@pbs.edu.pl

***Анотація* — Запропоновано модель вібраційного сигналу як періодично нестаціонарного випадкового процесу. Для виявлення прихованих періодичностей першого та другого порядку у вібраційному сигналі використано метод найменших квадратів (МНК). Запропоновано оцінку показника нестаціонарності, що базується на оцінках потужності гармонік функції математичного сподівання, що є визначальним для виявлення відмов та моніторингу обертових механізмів.**

Ключові слова — вібраційний сигнал; періодично нестаціонарний випадковий процес; математичне сподівання, кореляція; оцінки базової частоти; індикатор стану механізму.

I. Вступ

Для обчислення функції математичного сподівання, кореляційної функції та їх коефіцієнтів Фур'є на основі експериментальних даних можна застосовувати методи статистичного аналізу періодично нестаціонарних випадкових процесів (ПНВП) – когерентне (синхронне) усереднення [1–10], компонентий метод [11], або метод найменших квадратів [12]. Придатність певного методу залежить від специфіки конкретних експериментальних даних, мети аналізу та необхідної точності, проте всі ці методи можна використовувати у випадку, коли відомий період нестаціонарності сигналу (базова частота). У процесі аналізу вібраційних сигналів обертових механізмів цей період у багатьох випадках можна розрахувати на основі технічних параметрів досліджуваного механізму. Однак значення періоду, отримані таким чином, недостатньо точні та можуть також змінюватися в реальних умовах. Для забезпечення необхідної ефективності аналізу ПНВП потрібно визначити період нестаціонарності на основі вибраної (і обмеженої у часі) реалізації сигналу.

II. Методи визначення періодів нестаціонарності першого та другого порядку у вібраційних сигналах

Для визначення періоду нестаціонарності (прихованої періодичності) сигналу можна використовувати спеціальні функціонали [9-16], подібні до когерентних чи компонентних статистик, за винятком того, що замість істинного періоду у відповідних рівняннях використовується пробний період у проводиться сканування по тривалості пробного періоду у певній заданій області пошуку. Ці функціонали мають екстремальні значення в точках, які є асимптотично незміщеними та слушними оцінками величини періоду. Величини зміщення таких оцінок мають порядок $\mathrm{O}\left(T^{-2}\right)$, а дисперсії – порядок $\mathrm{O}\left(T^{-3}\right)$, де T – довжина реалізації сигналу. Для підвищення точності оцінки базової частоти у [12] було запропоновано використати метод найменших квадратів (МНК). Запропонований функціонал, що реалізує метод МНК для визначення оцінки базової частоти функції математичного сподівання (прихованої періодичності першого порядку) зі збільшенням довжини реалізації сигналу функціонал LS швидко прямує до:

$$\hat{F}_1(f)=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{L_1}\left[\left[\hat{m}_k^c(f)\right]^2+\left[\hat{m}_k^s(f)\right]^2\right], \quad (1)$$

де

$$\begin{Bmatrix}\hat{m}_k^c(f)\\ \hat{m}_k^s(f)\end{Bmatrix}=\frac{2}{2K+1}\sum_{n=-K}^{K}\xi(nh)\begin{Bmatrix}\cos 2k\pi fnh\\ \sin 2k\pi fnh\end{Bmatrix}, \quad (2)$$

$2T$ є довжина реалізації сигналу у часі, $h=\frac{T}{K}$ крок дискретизації, а L_1 є число гармонік базової частоти, взятих до розгляду. Точка максимуму $\hat{f}_0$ функціоналу (1) є асимптотично незміщеною і слушною оцінкою базової частоти функції математичного сподівання [12]. Значення ж функціоналу у точці максимуму $f=\hat{f}_0$ приблизно рівне усередненій у часі сумі потужностей вибраних гармонік базової частоти:

$$\hat{F}_1\left(\hat{f}_0\right)=\hat{P}_t^{(d)}=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{L_1}\left[\left[\hat{m}_k^c\left(\hat{f}_0\right)\right]^2+\left[\hat{m}_k^s\left(\hat{f}_0\right)\right]^2\right].$$

Величини $\hat{m}_k^c\left(\hat{f}_0\right)$ and $\hat{m}_k^s\left(\hat{f}_0\right)$ є асимптотично незміщені і слушні оцінки коефіцієнтів Фур'є функції математичного сподівання [17–19]. Далі, виходячи з статистичного означення:

$$\hat{m}_0=\frac{1}{2K+1}\sum_{n=-K}^{K}\xi(nh)$$

сформуємо оцінку функції математичного сподівання на основі оцінок параметрів базової частоти

$$\hat{m}\left(t,\hat{f}_0\right)=\hat{m}_0+\sum_{k=1}^{L_1}\begin{bmatrix}\hat{m}_k^c\left(\hat{f}_0\right)\cos 2k\pi\hat{f}_0t+\\ +\hat{m}_k^s\left(\hat{f}_0\right)\sin 2k\pi\hat{f}_0t\end{bmatrix}. \quad (3)$$

Вираз у (3) є інтерполяційною формулою для функції математичного сподівання для всіх $t\in[0,f_0^{-1}]$, якщо виконується наступна умова відсутності накладання (елайєзінгу) [11]:

$$h\le\frac{1}{\hat{f}_0(4L_1+1)}.$$

Функція у (3) описує детерміновану складову сигналу. Її амплітудний та фазовий спектри визначаються виразами:

$$\hat{A}\left(k\hat{f}_0\right)=\left[\left[\hat{m}_k^c\left(\hat{f}_0\right)\right]^2+\left[\hat{m}_k^s\left(\hat{f}_0\right)\right]^2\right]^{\frac{1}{2}},$$

$$\varphi_k\left(k\hat{f}_0\right)=\operatorname{arctg}\frac{\hat{m}_k^s\left(\hat{f}_0\right)}{\hat{m}_k^c\left(\hat{f}_0\right)}.$$

Далі представимо покрокову процедуру для визначення детермінованої складової сигналу вібрації:

– На основі реального оцифрованого вібраційного сигналу $\xi(nh)$ формуємо статистику (2);

– Підставляючи у (1) дані з (2), формуємо функціонал для числового аналізу визначення оцінки базової частоти. Число L_1 вибирається близьким до співвідношення f_m/f_r, де f_m — вища гранична частота спектру сигналу, а — f_r частота обертання приводу механізму;

– Потім обчислюємо функціонал (1) для частот, що лежать у інтервалі $[f_1,f_2]$, який містить частоту обертання f_r. Якщо ми хочемо знайти основну частоту з точністю до 10^{-3} Гц, то крок обчислення слід вибрати $\Delta f=10^{-3}$ Гц;

– Точки максимуму (1) приймаємо за оцінку базової частоти функції математичного сподівання, а значення функціоналу у цій точці $F_1\left(\hat{f}_0\right)$ приймаємо за оцінку потужності детермінованої складової коливань;

– Підставляючи $f=\hat{f}_0$ в (2), обчислюємо коефіцієнти Фур'є функції математичного сподівання, а також її амплітудний і фазовий спектри використавши (4);

– Використовуючи інтерполяційну формулу (3), обчислюємо значення функції математичного сподівання в інтервалі $t\in\left[0,\hat{P}\right]$, де $\hat{P}=1/\hat{f}_0$. Припускаючи, що $\hat{m}\left(t,\hat{f}_0\right)=m\left(t+\hat{P},\hat{f}_0\right)$, виділяємо стохастичну складову сигналу $\overset{\circ}{\xi}(nh)=\xi(nh)-\hat{m}\left(nh,\hat{f}_0\right)$.

Тепер можна отримати оцінку дисперсії на інтервалі $t\in\left[0,\hat{f}_0^{-1}\right]$ виходячи з $\hat{R}_k^c\left(0,\hat{f}_0\right)$, $\hat{R}_k^s\left(0,\hat{f}_0\right)$ та статистичного виразу:

$$\hat{R}_0(0)=\frac{1}{2K+1}\sum_{n=-K}^{K}\overset{\circ}{\xi}{}^2(nh).$$

Спектральні характеристики функції математичного сподівання використовуються для визначення вібраційного стану обертового механізму. Відповідні індикатори стану також можуть бути сформовані на основі величин гармонік. Індикатор стану визначається відношенням суми усереднених за часом потужностей гармонік для детермінованих коливань до усередненої за часом потужності стохастичної складової:

$$I_1 = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{L_1} \hat{A}_k^2\left(k\hat{f}_0\right) \Big/ \hat{R}_0(0) .$$

Величини індикаторів I_1 можуть відрізнятися залежно від досліджуваного механізму, типу несправності та стадії її розвитку.

ІІІ. Висновки

Представлені методи виявлення та оцінювання параметрів прихованих періодичностей першого порядку у складі вібраційного сигналу як ПНВП. Значення параметрів, що описують структуру ПНВП коливань вібрацій, можуть свідчити про вібраційний стан обертового механізму. Для оцінювання вібраційного стану механізмів запропоновано індикатор першого порядку I_1, що визначається як відношення повної потужності гармонік детермінованих коливань до усередненої за часом потужності стохастичної частини.

Література

[1] Cyclostationarity in Communications and Signal Processing. Ed. by Gardner W.A. New York: IEEE Press, 1994.

[2] H. L. Hurd, A. Miamee. Perodically Correlated Random Sequences Spectral Theory and Practice. New Jersey: Wiley-Interscience, 2007.

[3] A. Napolitano. Cyclostationary Processes and Time Series: Theory, Applications, and Generalizations, Elsevier, Academic Press, 2020.

[4] R. Isermann. Fault-Diagnosis Applications. Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-12767-0.

[5] J. Antoni. Cyclostationarity by examples. Mech. Syst. Signal Process. 23 (2009) 987–1036. doi: 10.1016/j.ymssp.2008.10.010

[6] C. Capdessus, M. Sidahmed, J. L. Lacoume. Cyclostationary Processes: Application in Gear Fault Early Diagnostics. Mech. Syst. Signal Process. 14 (2000) 371–385. doi: 10.1006/mssp.1999.1260.

[7] J. Antoni, F. Bonnardot, A. Raad, M. El Badaoui. Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. Mech. Syst. Signal Process. 18 (2004) 253–265. doi: 10.1016/S0888-3270(03)00088-8.

[8] Z. K. Zhu, Z. H. Feng, K. Fanrang. Cyclostationary analysis for gearbox condition monitoring: Approaches and effectiveness. Mech. Syst. Signal Process. 19 (2005) 467–482. doi: 10.1016/j.ymssp.2004.02.007.

[9] A. E. Del Grosso. Structural Health Monitoring: research and practice. Second Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2013). URL: www.researchgate.net/publication/261119109.

[10] A. E. Del Grosso, F. Lanata. Reliability estimate of damage identification algorithms. Reliability Engineering and Risk Management, 2012, 350–355. URL: https://www.researchgate.net/publication/235329357.

[11] I. Javorskyj, I. Matsko, R. Yuzefovych, G. Trokhym, P. Semenov. The coherent and component estimation of covariance invariants for vectorial periodically correlated random processes and its application. Applied Condition Monitoring 16 (2020) 56–91. doi: 10.1007/978-3-030-22529-2_4.

[12] I. Javorskyj, I. Matsko, R. Yuzefovych, O. Lychak, R. Lys. Methods of hidden periodicity discovering for gearbox fault detection. Sensors 21 (2021) 6138. doi: 10.3390/s21186138.

[13] Y. Kharchenko, L. Dragun. Mathematical modeling of unsteady processesin electromechanical system of ring-ball mill. Diagnostyka. 18 (2017) 25–35. URL: http://www.diagnostyka.net.pl/pdf-68437-17747

[14] Engineering Dynamics and Vibrations: Recent Developments. Edited by Junbo Jia, Jeom Kee Paik. Editors, CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9781315119908.

[15] G. W. Vogl, B. A. Weiss, M. A. Donmez. NISTIR 8012 Standards Related to Prognostics and Health Management (PHM) for Manufacturing: National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=916376.

[16] P. D. McFadden, J. D. Smith. Vibration monitoring of rolling element bearings by the high frequency resonance technique – a review. Tribol. Int.17 (1984) 3–10. doi: 10.1016/0301-679X(84)90076-8.

[17] I. Javorskyj, R. Yuzefovych, P. Kurapov. Periodically non-stationary analytic signals and their properties // International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, vol. 1, 7 November 2018, P. 191–194. doi: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526752

[18] I. Javorskyj, R. Yuzefovych, O. Lychak, R. Slyepko, P. Semenov. Detection of distributed and localized faults in rotating machines using periodically non-stationary covariance analysis of vibrations. Meas. Sci. Technology 34 (2023) 065102. doi: 10.1088/1361-6501/abcc93.

[19] I D. Ho, R. B. Randall.Optimization of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals. Mech. Syst. Signal Process. 14 (2000) 763–788. doi: 10.1006/mssp.2000.1304

До питання агрегування прогнозів ансамблю нейронних мереж для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.105

Ярослав Ходневич
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Київ, Україна
ya.v.khodnevych@gmail.com

Олександр Трофимчук
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Київ, Україна
Trofymchuk@nas.gov.ua

Василь Корбутяк
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
v.m.korbutiak@nuwm.edu.ua

***Анотація* — Розглядаються особливості ансамблю нейронних мереж для прогнозування емпіричного коефіцієнта гідравлічного опору у відкритих руслах річок, відомого як коефіцієнт шорсткості Шезі, та підхід для вирішення проблеми агрегування його прогнозів, який ґрунтується на модифікації методу голосування. Представлено результати апробації запропонованого ансамблю нейронних мереж. Реалізацію алгоритмів побудови моделей ансамблю, ансамблевого навчання, агрегування прогнозів штучних нейронних мереж здійснено за допомогою методів програмування Python.**

***Ключові слова* — Ансамблеве навчання, штучні нейронні мережі, метод Bagging, агрегування прогнозів, коефіцієнт шорсткості Шезі, Python.**

I. Вступ

Розглядається задача виявлення найкращого результату обчислень серед множини прогнозів ансамблю штучних нейронних мереж. При цьому система з трьох нейронних мереж застосовується для прогнозування емпіричного коефіцієнта гідравлічного опору у відкритих руслах річок, відомого як коефіцієнт шорсткості Шезі C [1]. Така задача є продовженням наших досліджень, які представлені в [2-5] та включали в себе огляд методів обчислення коефіцієнта Шезі, розробку структури даних для навчання штучної нейронної мережі (ШНМ), розробку базової моделі нейронної мережі (НМ) та її модифікацій.

Як відомо, коефіцієнт шорсткості Шезі дозволяє контролювати більшість факторів, що визначають гідравлічний опір. Він відіграє ключову роль у гідравлічних розрахунках, дозволяючи точно моделювати рух води в річках, каналах та інших відкритих водотоках на основі одно- та двовимірної математичних моделей гідродинаміки [1, 6]. Прогнозування коефіцієнта Шезі є критично важливим для багатьох інженерних та екологічних завдань в галузі водного господарства, зокрема, моделювання паводкових потоків, оцінки ризиків повеней, прогнозування загальної та локальної ерозії русла річки, транспортування та осадження наносів, моделювання транспорту забруднень тощо [6-8].

Ансамблеві методи машинного навчання широко застосовуються в різних сферах завдяки їх високій точності, стійкості до перенавчання та здатності узагальнювати дані. Ансамблеві методи ґрунтуються на принципі об’єднання прогнозів декількох індивідуальних моделей для отримання більш надійного і точного результату обчислень [9, 10]. В нашому випадку в якості моделей системи ансамблю застосовуються три однорідних повнозв'язних нейронних мережі із сигмоїдною функцією активації. Базова модель такої нейронної мережі була апробована в [3-5].

При розробці ансамблю нейронних для обчислення коефіцієнта шорсткості Шезі стикнулись з проблемою виявлення найкращого результату обчислень серед множини прогнозів моделей нейронних мереж. Розглядаються основні особливості запропонованого ансамблю нейронних мереж та підхід для вирішення проблеми агрегування його прогнозів, який ґрунтується на модифікації методу максимального голосування.

II. Обчислювальна модель для ансамблю нейронних мереж

Розглядається задача обчислення наближеного значення коефіцієнта шорсткості Шезі $C(x_1, x_2)$ за

допомогою ансамблю ШНМ на основі наступної обчислювальної моделі:

$$C(x_1, x_2) = C_A \pm \varphi,\ x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\},\ x_2 \in \{h, R\},.(1)$$

де $C_A = f(x_1, x_2)$ – значення коефіцієнта Шезі в першому наближенні ($м^{1/2}/с$), що обчислюється за допомогою базової ШНМ (ANN-A), яка була апробована в [3-5]; $\varphi = f(x_1, x_2)$ – величина уточнення, яка встановлюється за допомогою двох додаткових ШНМ (ANN-B1, ANN-B2), що побудовані на основі базової моделі мережі; n – коефіцієнт шорсткості Гоклера-Меннінга ($с/м^{1/3}$), Δ – висота виступів шорсткості русла (м), S_f – гідравлічний ухил, B – середня ширина потоку (м), h – середня глибина потоку (м), R – гідравлічний радіус (м).

III. Ансамблеві методи

A. Модель ансамблю

Пропонується однорідний ансамбль, який складається з трьох однотипних повно-зв'язних нейронних мереж прямого поширення – ANN-A, ANN-B1 та ANN-B2 (рис. 1). Кожна НМ має вхідний шар, один прихований шар та вихідний шар. Кількість нейронів у вхідному шарі відповідає кількості вхідних гідрологічних та гідро-морфологічних параметрів. Кількість нейронів у вихідному шарі дорівнює одному, оскільки обчислюється єдине значення: у випадку основної моделі ANN-A – значення коефіцієнта Шезі в першому наближенні C_A , у випадку допоміжних моделей ANN-B1 та ANN-B2 – відповідно значення величини $\varphi_{B1} = +\varphi$, $\varphi_{B2} = -\varphi$, які використовується для уточнення C_A згідно (1). В якості функції активації в прихованих шарах НМ використовується сигмоїдна функція [9-13].

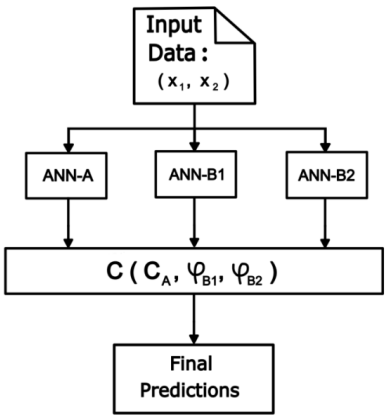


Рис. 1. Структура однорідного ансамблю нейронних мереж

B. Ансамблеве навчання

Навчальні та тестові приклади для нейронних мереж побудовані відповідно до принципів безперервності, однорідності, ненадлишковості та нормалізації. Ці набори даних отримані з польових спостережень за гідрологічними та гідро-морфологічними параметрами на окремих ділянках рівнинних та гірських річок [14]. Дані включають: висоту та ширину потоку, середню швидкість потоку, гідравлічний ухил, розмір частинок донного матеріалу та інші характеристики, що визначають гідравлічний опір.

Формування навчальних вибірок та подальше навчання для кожної НМ ансамблю здійснюється на основі методу Bagging [9, 10]. Суть методу полягає у навчанні кількох моделей одного типу на окремих підвибірках навчальних даних та об'єднанні їх прогнозів. В нашому випадку навчання цих моделей здійснюється паралельно за допомогою методу зворотного поширення похибки [11-13].

C. Метод об'єднання прогнозів моделей ансамблю

На основі навченого ансамблю нейронних мереж наближена оцінка досліджуваного емпіричного коефіцієнта Шезі виконується за допомогою агрегування прогнозів трьох моделей із застосуванням модифікованого методу голосування на основі вирішення зворотної задачі. А саме, учасники ансамблю створюють прогнози C_A, φ_{B1}, φ_{B2} (рис. 1), які об'єднуються з врахуванням (1). Прогнози C_A, C_{B1}, C_{B2} аналізуються для отримання сукупного прогнозу, який найкраще відповідає вхідним умовам задачі (1).

IV. Дослідження проблеми агрегування прогнозів моделей ансамблю

В нашому випадку агрегування прогнозів моделей НМ ANN-A, ANN-B1 та ANN-B2 в єдиний результат обчислень ансамблю здійснюється на основі методу максимального голосування [9]. Ідея такого підходу передбачає визначення прогнозів для кожної нейронної мережі ансамблю та прогнозування тільки тієї оцінки певної НМ, яка найкраще відповідає вхідним умовам задачі (1).

В рамках нашого дослідження розглядались дві гіпотези щодо встановлення найкращої оцінки коефіцієнта Шезі (1) серед множини прогнозів C_A, C_{B1}, C_{B2}, які дозволяють отримати відповідні нейронні мережі запропонованого ансамблю.

A. Гіпотеза 1

Запропоновані однотипні моделі нейронних мереж ансамблю навчаються на окремих відповідних підвибірках навчальних даних. Припускаємо, що для всіх нових вхідних даних ансамблю в межах предметної області (які не включались в навчальні приклади і для яких потрібно обчислити наближене значення коефіцієнта Шезі) існує їх найкраща наближена відповідність одній з підвибірок навчальних даних. Тоді єдиний результат ансамблю обчислюється згідно (1) за допомогою відповідної нейронної мережі, яка навчалась на таких даних.

B. Гіпотеза 2

Розглядається зворотна задача для обчислення швидкостей водного потоку V_p та V_o (м/с) з врахуванням прогнозів значень коефіцієнта Шезі (які отримані за допомогою трьох моделей нейронних мереж згідно (1)) C_A, C_{B1}, C_{B2} та вхідних даних гідрологічних спостережень. Припускаємо, що для найкращої (вихідної) оцінки коефіцієнта

Шезі $C(x_1, x_2)$, яка обирається серед наближених прогнозів C_A, C_{B1}, C_{B2} моделей ансамблю, виконується умова, що наближене значення швидкості водного потоку V_p, яке обчислене за допомогою цієї оцінки C, найменше відхиляється від її еталонного (очікуваного) значення V_o.

V. Результати

Перевірка гіпотез 1 та 2 виконувалась на прикладі гідроморфологічних даних на ділянці р. Дніпро (нижче за течією від м. Київ) [3, 4].

За підсумками застосування алгоритму гіпотези 1 для агрегування прогнозів ансамблю нейронних мереж в один вихідний результат прогнозування коефіцієнта Шезі C встановлено, що отримані його значення можуть не відповідати очікуваним. Такі обставини можна пояснити наступним чином. В умовах неповноти і різноманітності даних про характеристики річок (кількісні та якісні), що визначають особливості поведінки гідравлічного опору, існують випадки, коли деякому вектору гідрологічних та гідро-морфологічних параметрів не вдається вірно поставити у відповідність образ, клас (кластер), який описує діапазон поведінки значень коефіцієнта Шезі. В рамках гіпотези 1 такі обставини можуть призвести до хибного встановлення вихідної оцінки коефіцієнта Шезі C (1). Тому гіпотезу 1 спростовано.

За результатами обчислень згідно алгоритму гіпотези 2 встановлено, що отримані вихідні значення прогнозування коефіцієнта Шезі C відповідають його очікуваним значенням. Тому гіпотезу 2 підтверджено. В нашому дослідженні умови гіпотези 2 покладена в основу обчислювального алгоритму для прогнозування коефіцієнта гідравлічного опору за допомогою ансамблю нейронних мереж.

VI. Висновки

Представлено модифікований метод агрегування прогнозів ансамблю штучних нейронних мереж для випадку прогнозування емпіричного коефіцієнта шорсткості Шезі у відкритих руслах річок на основі польових даних про їх гідрологічні та гідро-морфологічні характеристики.

Виконано апробацію запропонованого однорідного ансамблю нейронних мереж для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору на основі гідрологічних польових даних окремих ділянок рівнинних і гірських річок. Встановлено, що відносні похибки прогнозів знаходяться в межах 0,3% ÷ 6,1%, коефіцієнт ефективності моделі Неша-Сатклiффа NSE = 0,991 ÷ 0,998.

Результати підтверджують ефективність підходу на основі ансамблю нейронних мереж для оцінки гідравлічного опору у відкритих руслах річок в умовах обмежених або неповних вхідних даних.

Реалізацію алгоритмів побудови моделей ансамблю, ансамблевого навчання, агрегування прогнозів нейронних мереж ансамблю здійснено за допомогою методів програмування Python та представлено в [15]. Розробка ансамблевого підходу на Python забезпечує просту інтеграцію в гідрологічні інформаційно-аналітичні системи.

Література

[1] Sturm, T.W. (2001). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, N.Y., 493 p.

[2] Stefanyshyn, D. V., Khodnevich, Y. V., Korbutiak, V. M. (2021). Estimating the Chezy roughness coefficient as a characteristic of hydraulic resistance to flow in river channels: a general overview, existing challenges, and ways of their overcoming. Environmental safety and natural resources, 39 (3), 16–43. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.16-43

[3] Yaroslav V. Khodnevych, Dmytro V. Stefanyshyn (2022). Data arrangements to train an artificial neural network within solving the tasks for calculating the Chezy roughness coefficient under uncertainty of parameters determining the hydraulic resistance to flow in river channels. Environmental safety and natural resources, Vol. 42 № 2, 59-85. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.59-85

[4] Khodnevych, Y., Stefanyshyn, D., Korbutiak, V. (2023). The Chezy Roughness Coefficient Computing Using an Artificial Neural Network to Support the Mathematical Modelling of River Flows. In: Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Ustimenko, V., Globa, L. (eds) Information and Communication Technologies and Sustainable Development. ICT&SD 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 809. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_26

[5] Yaroslav Khodnevych, Dmytro Stefanyshyn (2023). Do we need a more sophisticated multilayer artificial neural network to compute roughness coefficient? Environmental safety and natural resources, Vol. 48 (4), 170–182. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.170-182

[6] Julien, P.Y. (2002). River Mechanics. Cambridge University Press, UK, 456 p.

[7] De Wrachien, D., Mambretti, S., and Sole, A. (2010). Mathematical models in flood management: overview and challenges. WIT Trans. on Ecology and the Environment, Vol. 133. Flood Recovery, Innovation and Response, 61–72; doi:10.2495/FRIAR100061

[8] Julien, P.Y. (2010). Erosion and sedimentation. Cambridge University Press, 371 p.

[9] Mohammed, A., and Kora, R. (2023). A comprehensive review on ensemble deep learning: Opportunities and challenges. Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences, 35, 757-774.

[10] Gautam Kunapuli (2023). Ensemble Methods for Machine Learning. Published by Manning, 352 p.

[11] Rokach, L. (2019). Ensemble Learning: Pattern Classification Using Ensemble Methods. World Scientific Publishing Company, 300 p.

[12] Haikin, S. (2008). Neural Networks and Learning Machines (3rd Edition). Prentice Hall, 906 p.

[13] Ahmed Fawzy Gad, Fatima Ezzahra Jarmouni (2021). Introduction to Deep Learning and Neural Networks with Python. A Practical Guide - 2021 Elsevier Inc. 285 p.

[14] В.І. Вишневський, О.О. Косовець (2003). Гідрологічні характеристики річок України - К.: Ніка-Центр, 324 с.

[15] Khodnevych, Ya. (2025). Software Implementation of a Computational Algorithm for Training an Ensemble of Neural Networks to Predict the Chezy Roughness Coefficient. https://github.com/yakhodnevych/ANNE_approximation_C.git

StEPConFi: доступний метод отримання плюрипотентності

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.106

Денис Чергикало
Факультет комп'ютерних наук та кібернетики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Київ, Україна
denischergicalo@gmail.com

Анотація — **Багато електроманітних терапій вже впроваджені в клінічну практику та одобрені FDA. Найбільш дослідженим із таких є використання імпульсних електромагнітних полів(PEMFs) для лікування переломів кісток які самостійно не загоюються. Однак опис механізмів, що лежать в основі впливів електромагнітних полів на людину, усе ще вивчається через свою складність. Пролити світло на це мають дослідження впливу електромагнітних полів на різні популяції клітин. Існуючі дослідження в області таких впливів уже створюють інтригуючі методи, у яких електромагнітні поля використовуються для посилення різних тенденцій у клітинних популяціях. Це створює несподівані методи, такі як отримання плюрипотентних клітин, інфікуючи їх лише одним фактором Яманака — Oct4. Можливість перепрограмування одним фактором інтригує тим, що процес має суттєво спроститися і стати набагато доступнішим. Також зменшується гетерогенність усередині популяції і немає необхідності використовувати фактор c-MYC, що, в свою чергу, має зменшити онкогенні ризики.**

Ключові слова **— математична біологія; перепрограмування клітин; біологічні електромагнітні патерни**

I. Вступ

Міждисциплінарна група дослідників вивчала вплив низькочастотних електромагнітних полів (EL-EMFs) (10, 50, 100 Гц) на ефективність отримання плюрипотентних клітин із фібробластів кінчика хвоста миші. Дослідження показало великий ефект — підвищення кількості отриманих плюрипотентних клітин у 30 разів. Ефективність впливу EL-EMFs дала підстави для гіпотези, що їх дія може замінити деякі інші фактори; у цьому ж дослідженні виявили, що лише один фактор Oct4 у поєднанні з EL-EMFs може дати якісні плюрипотентні клітини [1].

Це вже дає більш доступний метод, аніж використання всіх чотирьох факторів Яманака, але також потрібно зрозуміти, якими мають бути умови для електромагнітного поля. Також у їхній статті не описано механізм, через який EL-EMFs впливають на експресію Mll2.

Електромагнітні поля впливають передусім на потенціалзалежні іонні канали. Тому саме динаміка Ca2+, K+ та Na+ найбільше впливає на епігенетичні програми клітини, пов’язані з аналізом і реакцією на зовнішні сигнали. Найбільший вплив на епігенетичні програми має Ca2+ [11], оскільки він є універсальним месенджером у клітині.

Однак, вочевидь, EL-EMFs через низьку частоту та невелику напруженість магнітного поля (1 мТ) не може безпосередньо впливати на коливання іонів. Дослідники часто обґрунтовують вплив EL-EMFs на організм опосередкованими механізмами, які еволюційно сформувалися через необхідність деяких організмів аналізувати вплив магнітного поля Землі [1][8]. Більшість досліджень демонструють основний вплив EL-EMFs саме на фактори, що регулюють клітинний цикл [1][8].

Також дослідження на тему EL-EMFs зазвичай мають найбільш цікаві результати тоді, коли аналізується вплив на стовбурові клітини чи клітини, що експресують фактори, пов’язані з плюрипотентністю. Це можна пов’язати з тим, що зазвичай саме ці клітини найбільш чутливі до зовнішніх сигналів. Можливим чинником є також ізоляція/пригнічення зовнішніх магнітних полів під час експерименту, що збільшує чутливість клітинних популяцій до слабших магнітних полів. EL-EMFs також може впливати на синхронізацію коливань кальцію між клітинами [10].

На відміну від EL-EMFs, такі методи, як PEMFs[17], через імпульси на частоті тисяч герців мають набагато вище середнє значення $\left\|\frac{dB}{dt}\right\|$, інакше кажучи, продукують сильніші індуковані струми на мембрані. Ці струми, в свою чергу, впливають на коливання мембранного потенціалу, які безпосередньо створюють чи змінюють коливання внутрішньоклітинного Ca2+.

У цій статті обговорюються деякі гіпотези, перевірка яких допоможе зробити метод отримання плюрипотентних клітин через електромагнітні поля більш прогнозованим та безпечним.

II. Прямий вплив електромагнітних полів на клітини

Різні терапії використовують різні способи викликати струм, який впливає на клітину; у випадку EL-EMFs та PEMFs це індукція струму через змінне магнітне поле. Індукція струму може відбуватися як на самих клітинах, так і на

спеціальних імплантах, які дозволяють робити цю індукцію більш правильно локалізованою. Також для впливу на клітини використовується пряма стимуляція електричними імпульсами чи постійним електричним полем (Capacitive-coupling electric fields)[15]. Терапії PEMFs, Capacitive-coupling electric fields, Implanted direct-current bone stimulators[16] схвалені FDA для лікування переломів кісток які не зрощуються самостійно, за винятком черепа та хребта. Ці різні методи стимуляції дозволяють по-різному локалізувати зовнішні струми $I_{outer}(t)$, які діють на клітини, тим самим впливаючи лише там, де це корисно [5–6].

Для того, щоб зрозуміти механізм дії цих струмів на клітину, ми маємо особливо враховувати канали, що відповідають за аналіз зовнішніх сигналів і регулюють вплив електромагнітних полів на клітину.

Одним із базових регуляторів впливу електромагнітних полів на клітину є випрямляючі K+-канали (Kir): вони пропускають іони K+ усередину і не випускають назовні. Також ми маємо врахувати потенціалзалежні кальцієві канали (VGCCs).

Відомо, що канал Kir може пропускати невеликі струми в інший бік, послаблюючи їх; така поведінка схожа на множення лінійної функції на функцію активації [2–4], тому локальна зміна потенціалу від цього каналу буде приблизно пропорційна:

$$R(V)(V - E_K), R(V) = \frac{1}{1 + exp\left(\frac{(V - V_b)}{k_b}\right)}$$

Аналогічно ми моделюватимемо локальну зміну потенціалу від VGCC, але з тим, що активація відбуватиметься за потенціалу, вищого за пороговий рівень V_{th}:

$$m(V)(V - E_{Ca}), m(V) = \frac{1}{1 + exp\left(\frac{-(V - V_{th})}{k_m}\right)}$$

Подібні функції активації також було розглянуто в різних дослідженнях, у яких аналізували запис реальних коливань внутрішньоклітинного кальцію у відповідь на зовнішні магнітні поля [8].

Також багато різних потенціалзалежних каналів пригнічують різкі електромагнітні сплески та адаптують клітину до статичних електромагнітних полів; цей процес можна промоделювати через змінну y, остаточно маємо диференційне рівняння:

$$C_m \frac{dV}{dt} = -g_L(V - E_L) - g_{Kir}R(V)(V - E_K) -$$

$$-g_{Ca}m(V)(V - E_{Ca}) - g_{ad}y + I_{outer}(t)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{(V - V_{rest} - y)}{tau_{adapt}}$$

Диференціальне рівняння, яке описує вплив струмів на мембрану, має таку спрощену форму через те, що електромагнітні коливання, на які розкладається EL-EMFs чи навіть PEMFs, мають частоти до декількох кГц. Можливість майже ідеально описати динаміку впливу зовнішніх струмів було відкрито давно[14], за що було отримано нобелівську премію, хоч рівняння може мати різні функції активації в залежності від типу клітини.

Завдяки простоті диференційного рівняння, коливаннями мембранного потенціалу можна керувати. Ці коливання, в свою чергу, впливають на різні мікродомени кальцію, які керують епігенетичними програмами клітини [11].

III. Гіпотеза перспективного методу

Більшість непрямих ефектів від EL-EMFs описується через взаємодію між різними клітинами, у межах якої клітини краще обмінюються цільовими сигналами чи синхронізують свої коливання [10]. У випадку диференціації наявність конексинів є критичною [12], у випадку отримання плюрипотентності відсутність комунікації може суттєво погіршити результат перепрограмування [13].

Комунікація між клітинами для перепрограмування важлива, але для неї потрібні початкові коливання Ca2+ чи цільові сигнали в деяких уже наявних клітинах. І ці правильні сигнали надалі мають поступово синхронізуватися, поширюючись на інші клітини. Водночас дуже мало досліджень комбінують методи прямої стимуляції, такі як PEMFs, та методи, що впливають на комунікацію між клітинами, такі як EL-EMFs.

Наприклад, можна за допомогою PEMFs стимулювати правильні початкові коливання кальцію, які мають активувати цільові програми клітини, а потім за допомогою EL-EMFs дати змогу клітинам самостійно синхронізувати коливання кальцію та сигнали, що підтримуватимуть популяцію клітин. Через деякий час стан клітин зміниться, і їм будуть потрібні нові керуючі імпульси від PEMFs, які знову мають бути синхронізовані за допомогою EL-EMFs.

Назвемо такий метод Stable Electromagnetic Pulsed Control Fields — StEPConFi. Для того, щоб не доводилося використовувати окремий прилад для EL-EMFs, можна застосувати той самий пристрій для PEMFs, але налаштувати його вплив на мембранний потенціал таким чином, щоб він був дуже схожий на вплив від EL-EMFs.

IV. Висновки

Користь від спрощення отримання персоналізованих стовбурових клітин важко переоцінити: це і можливість безпечнішої терапії стовбуровими клітинами, і прискорення досліджень, пов’язаних зі стовбуровими клітинами. Правильне перепрограмування і налагодження комунікації між клітинами може бути важливим для більш ефективного вирощування органів.

Крім того, метод має не лише спростити отримання клітин, а й зменшити онкогенні ризики, що є одним із найбільших ризиків під час використання стовбурових клітин для регенерації різних частин тіла.

Ефективність методу StEPConFi потрібно підтвердити в лабораторних дослідженнях.

ЛІТЕРАТУРА

[1] S. Baek, X. Quan, S. Kim, C. Lengner, J. K. Park, and J. Kim, “Electromagnetic fields mediate efficient cell reprogramming into a pluripotent state,” ACS Nano, vol. 8, no. 10, pp. 10125–10138, Oct. 2014.

[2] H. Hibino, A. Inanobe, K. Furutani, et al., “Inwardly rectifying potassium channels: structure, function, and physiology,” Physiol. Rev., vol. 90, pp. 291–366, 2010.

[3] A. N. Lopatin, E. N. Makhina, and C. G. Nichols, “Potassium channel block by cytoplasmic polyamines as the mechanism of inward rectification of Kir currents,” Nature, vol. 372, pp. 366–369, 1994.

[4] X. Tao, J. L. Avalos, J. Chen, and R. MacKinnon, “Crystal structure of the eukaryotic strong inward-rectifier K+ channel Kir2.2,” Science, vol. 326, pp. 1668–1674, 2009.

[5] R. Plonsey and R. C. Barr, “Bioelectricity: A Quantitative Approach,” 3rd ed. New York, NY, USA: Springer, 2007.

[6] J. P. Reilly, “Applied Bioelectricity: From Electrical Stimulation to Electropathology,” New York, NY, USA: Springer, 1998.

[7] V. Zablotskii, T. Polyakova, O. Lunov, and A. Dejneka, “How a high-gradient magnetic field could affect cell life,” Sci. Rep., vol. 6, no. 1, Art. no. 37407, 2016.

[8] W. Tang, et al., “Extremely low-frequency electromagnetic fields facilitate proliferation and functional differentiation in spinal neural stem cells,” Sci. Rep., vol. 15, no. 1, Art. no. 29291, 2025.

[9] P. Chen, et al., “Pulsed electromagnetic stimulation promotes neuronal maturation by up-regulating cholesterol biosynthesis,” Stem Cell Res. Ther., vol. 16, no. 1, Art. no. 406, 2025.

[10] J. Wei, J. Sun, H. Xu, L. Shi, L. Sun, and J. Zhang, “Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on intracellular calcium transients in cardiomyocytes,” Electromagn. Biol. Med, vol. 34, no. 1, pp. 77–84, 2015.

[11] T. Ma, Q. Ding, C. Liu, and H. Wu, “Electromagnetic fields regulate calcium-mediated cell fate of stem cells: osteogenesis, chondrogenesis and apoptosis,” Stem Cell Res. Ther., vol. 14, no. 1, Art. no. 133, 2023.

[12] A. Ngezahayo and F. A. Ruhe, “Connexins in the development and physiology of stem cells,” Tissue Barriers, vol. 9, no. 4, Art. no. 1949242, 2021.

[13] M. Oyamada, K. Takebe, A. Endo, S. Hara, and Y. Oyamada, “Connexin expression and gap-junctional intercellular communication in ES cells and iPS cells,” Front. Pharmacol., vol. 4, Art. no. 85, 2013.

[14] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley, “A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve,” J. Physiol., vol. 117, no. 4, pp. 500–544, 1952.

[15] J. Meneses, S. Fernandes, N. Alves, P. Pascoal-Faria, and P. C. Miranda, “How to correctly estimate the electric field in capacitively coupled systems for tissue engineering: a comparative study,” Sci. Rep., vol. 12, no. 1, Art. no. 11049, 2022.

[16] P. Zhou, F. He, B. Liu, and S. Wei, “Nerve electrical stimulation enhances osseointegration of implants in the beagle,” Sci. Rep., vol. 9, no. 1, Art. no. 4916, 2019.

[17] T. Wang, et al., “Pulsed electromagnetic fields mediate sensory nerve regulation for bone formation in aging models,” Nat. Commun., vol. 16, no. 1, Art. no. 8223, 2025.

MCIT Modeling, control & information technologies

Моделювання дифузійних процесів у багатофазному випадково неоднорідному тілі з використанням діаграм Фейнмана

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.107

Юрій Чернуха
Кафедра обчислювальної математики і програмування
Національний університет "Львівська політехніка",
Львів, Україна
yurii.a.chernukha@lpnu.ua

Abstract—**Проведено математичне моделювання дифузії домішки в багатофазному випадково неоднорідному тілі. Рівняння дифузії сформульовані для кожної фази, на випадкових міжфазних границях задані неідеальні умови контакту. Задачу зведено до інтегро-диференційного рівняння з випадковим ядром. Розв'язок отримано у вигляді ряду Неймана, усереднення проведено за ансамблем конфігурацій фаз. Розвинуто техніку діаграм Фейнмана для параболічних задач, отримано рівняння Дайсона для усередненого поля концентрації. У наближенні Бурре отримано рівняння масоперенесення для середовища з рівномірним розподілом фаз.**

Ключові слова— математичне моделювання, дифузія, багатофазне випадково неоднорідне середовище, усереднене поле, діаграма Фейнмана.

I. Вступ

Діаграми Фейнмана є одним з базових інструментів сучасної науки: від квантової теорії поля до алгоритмічних методів обчислень [1,2,3]. У задачах математичного моделювання процесів масоперенесення [4] в стохастично неоднорідних багатофазних тілах діаграмні підходи дають узгоджений опис випадкових міжфазних взаємодій і статистики полів. Запропонований підхід є зручним для перетворень і аналізу і дає відмінні від гомогенізованих моделей результати, забезпечуючи системне врахування випадкової геометрії.

В роботі розвинуто техніку діаграм Фейнмана для моделювання дифузії домішки в багатофазному випадково неоднорідному тілі за неідеальних умов на випадкових межах контакту фаз. Отримано інтегро-диференціальне рівняння з випадковим ядром та рівняння на усереднене за ансамблем конфігурацій фаз поле концентрації, подане через масовий оператор. Крайова задача отримана та розв'язана для двофазного тіла за рівномірного розподілу фаз.

II. Постановка задачі

Розглянемо дифузію домішкової речовини у багатофазному випадково неоднорідному тілі, яке складається з $N+1$ твердих, різних за густиною та коефіцієнтом дифузії фаз – матриці і включень довільної форми. При цьому точна геометрична конфігурація фаз в області тіла невідома. Тоді координати розташування включень є невідомими, але приймаємо, що відомий закон їхнього імовірнісного розподілу [5]. Крім того, вважаємо, що об'ємна частка матриці є набагато більшою, ніж об'ємна частка включення, $v_j << v_0$ ($j=1,...,N$). Припускаємо, що густина тіла та коефіцієнт дифузії є сталими в об'ємі кожної фази.

Концентрації $c_j(\vec{r},t)$ домішкової речовини в матриці (область Ω_0) і включеннях (області Ω_j , $j=1,...,N$) визначаються з рівнянь дифузії [6], сформульованих для кожної фази окремо

$$\rho_j \frac{\partial c_j(\vec{r},t)}{\partial t} = d_j \Delta c(\vec{r},t),\ \vec{r}\in\Omega_j,\ t\in[0,\tau],\ \tau<\infty. \quad (1)$$

Тут ρ_j – густина речовини в області Ω_j ; $d_j=\rho_j D_j$ – кінетичний коефіцієнт перенесення домішки в Ω_j , D_j – коефіцієнт дифузії.

Вважаємо, що на зовнішній границі тіла знаходиться матриця і задані такі початкові і граничні умови

$$c_j(\vec{r},t)\big|_{t=0} = \hat{c}_j(\vec{r})\ (j=0,...,N),$$
$$c_0(\vec{r},t)\big|_{\vec{r}\in\delta V} = \tilde{c}(t). \quad (2)$$

На границях розділу областей Ω_0 та Ω_j ($j=1,...,N$) виконуються умови неідеального контакту щодо концентрації [6, 7]

$$k_j c_j(\vec{r},t)\big|_{\vec{r}\in\Gamma_{jl}-0} = k_l c_l(\vec{r},t)\big|_{\vec{r}\in\Gamma_{jl}+0}; \quad (3)$$

$$\rho_j d_j \vec{\nabla} c_j(\vec{r},t)\big|_{\vec{r}\in\Gamma jl-0} = \rho_l d_l \vec{\nabla} c_l(\vec{r},t)\big|_{\vec{r}\in\Gamma_{jl}+0}. \quad (4)$$

Тут Γ – загальна границя контакту фаз, яка складається з границь контакту однозв'язних областей $\Gamma=\bigcup_{j=0}^{N}\bigcup_{i=1}^{n_j}\Gamma_{ji}$, де Γ_{ji} – межа i -ї однозв'язної області j -ї фази Ω_{ji} , n_j – кількість однозв'язних областей у фазі j .

Тоді випадковими величинами є границі контакту, тобто межі областей Ω_{ji}, які є внутрішніми для тіла, що призводить до стохастичності поля концентрації дифундуючої речовини.

III. Рівняння масоперенесення для усього тіла

Зведемо контактну задачу (1), (3), (4) до рівняння масоперенесення для тіла в цілому. Введемо в розгляд випадкову функцію просторових координат $c(\vec{r},t)$, яка описує концентрацію в усьому тілі

$$c(\vec{r},t)=\begin{cases} c_j(\vec{r},t), & \vec{r}\in\left(V^{(j)}\right), \quad j=0,...,N \\ \textit{контактні умови}\ (3),(4), & \vec{r}\in\Gamma. \end{cases}$$

Знаходимо $\vec{\nabla}c(\vec{r},t)$ і $\Delta c(\vec{r},t)$ з урахуванням розривів 1-го роду (умови (3), (4)) на границях контакту областей Γ, які підставляємо в рівняння балансу маси. Введемо в розгляд випадковий оператор $\eta_{ij}(\vec{r})$, визначений таким чином

$$\eta_{ji}(\vec{r})=\begin{cases} 1, & \textit{якщо } \vec{r}\in\Omega_{ji}, \\ 0, & \textit{якщо } \vec{r}\notin\Omega_{ji}, \end{cases} \qquad \sum_{j=0}^{N}\sum_{i=1}^{n_j}\eta_{ji}(\vec{r})=1.$$

Тоді маємо [8]

$$\begin{aligned} Lc\equiv&\sum_{j=0}^{N}\sum_{i=1}^{n_j}\rho_j\eta_{ji}(\vec{r})\frac{\partial c}{\partial t}-\sum_{j=0}^{N}\sum_{i=1}^{n_j}d_j\eta_{ji}(\vec{r})\Delta c- \\ &-\frac{1}{2}\sum_{j=0}^{N}\sum_{i=1}^{n_j}\left[d(\vec{r})\right]_{\Gamma_{ji}}\left[\vec{\nabla}c\right]_{\Gamma_{ji}}\delta(\vec{r}-\vec{r}_{\Gamma_{ji}})- \\ &-\frac{1}{2}\sum_{j=0}^{N}\sum_{i=1}^{n_j}\left[d(\vec{r})\right]_{\Gamma_{ji}}\left[\vec{\nabla}c\right]_{\Gamma_{ji}}\vec{\nabla}\delta(\vec{r}-\vec{r}_{\Gamma_{ji}})- \\ &-\frac{1}{2}\sum_{j=0}^{N}\sum_{i=1}^{n_j}\left[d(\vec{r})\right]_{\Gamma_{ji}}\left[c\right]_{\Gamma_{ji}}\delta^2(\vec{r}-\vec{r}_{\Gamma_{ji}})=0, \end{aligned} \qquad (5)$$

де $\vec{r}_\Gamma$ – радіус-вектор точок границі Γ; $[...]_\Gamma$ – стрибок функції на границі Γ; $\delta(\cdot)$ – дельта-функція Дірака.

Додамо і віднімемо в рівнянні (5) детермінований оператор $L_0(\vec{r},t)$ з коефіцієнтами, що є характеристиками основної фази (матриці)

$$L_0(\vec{r},t)=L_0(z,t)=\rho_0\frac{\partial}{\partial t}-d_0\Delta.$$

Тоді одержимо

$$L_0(\vec{r},t)c(\vec{r},t)=L_s(\vec{r},t)c(\vec{r},t), \qquad (6)$$

де оператор $L_s(\vec{r},t)$ є наступним

$$\begin{aligned} L_s(\vec{r},t)=&\sum_{j=1}^{N}(\rho_0-\rho_j)\sum_{i=1}^{n_j}\eta_{ji}(\vec{r})\frac{\partial}{\partial t}- \\ &-\sum_{j=1}^{N}(d_0-d_j)\sum_{i=1}^{n_j}\eta_{ji}(\vec{r})\Delta+ \\ &+\frac{1}{2}\sum_{j=0}^{N}\sum_{i=1}^{n_j}\left[d(\vec{r})\right]_{\Gamma_{ji}}\left[\vec{\nabla}...\right]_{\Gamma_{ji}}\delta\left(\vec{r}-\vec{r}_{\Gamma_{ji}}\right)+ \\ &+\frac{1}{2}\sum_{j=0}^{N}\sum_{i=1}^{n_j}\left[d(\vec{r})\right]_{\Gamma_{ji}}\left[...\right]_{\Gamma_{ji}}\vec{\nabla}\delta\left(\vec{r}-\vec{r}_{\Gamma_{ji}}\right)+ \\ &+\frac{1}{2}\sum_{j=0}^{N}\sum_{i=1}^{n_j}\left[d(\vec{r})\right]_{\Gamma_{ji}}\left[...\right]_{\Gamma_{ji}}\delta^2\left(\vec{r}-\vec{r}_{\Gamma_{ji}}\right). \end{aligned} \qquad (7)$$

Таким чином отримано стохастичне диференціальне рівняння масоперенесення домішки для середовища з випадково розташованими включеннями у вигляді (5), а «збурене» диференціальне рівняння – (6) з випадковим оператором (7).

IV. Інтегро-диференціальне рівняння масоперенесення. Ряд Неймана

Розглядаючи праву частину рівняння (6) як джерела, будуємо інтегро-диференціальне рівняння, еквівалентне вихідній контактно-крайовій задачі (1), (2), (3), (4) [8]

$$\begin{aligned} c(\vec{r},t)=&\,c_h(\vec{r},t)+ \\ &+\int_0^t\int_{(V)}G(\vec{r},\vec{r}\,',t,t')L_s(\vec{r}\,',t')c(\vec{r}\,',t')\,d\vec{r}\,'dt'. \end{aligned} \qquad (8)$$

Тут $c_h(\vec{r},t)$ – розв'язок однорідної крайової задачі,

$G(\vec{r},\vec{r}\,',t,t')$ – функція Гріна, яка є розв'язком відповідної детермінованої крайової задачі з точковим джерелом.

Розв'язок інтегро-диференціального рівняння (8) шукаємо у вигляді інтегрального ряду Неймана, вибравши за нульове наближення концентрацію в однорідному тілі $c_h(\vec{r},t)$.

$$\begin{aligned} c=c_h&+\int_0^t\int_{(V)}GL_sc_h\,d\vec{r}\,'dt'+\int_0^t\int_{(V)}GL_s\int_0^{t'}\int_{(V)}GL_sc_h\,d\vec{r}\,''dt''d\vec{r}\,'dt'+ \\ &+\int_0^t\int_{(V)}GL_s\int_0^{t'}\int_{(V)}GL_s\int_0^{t''}\int_{(V)}GL_sc_h\,d\vec{r}\,'''dt'''d\vec{r}\,''dt''d\vec{r}\,'dt'+....\end{aligned} \qquad (9)$$

V. Техніка діаграм Фейнмана для задачі масоперенесення у випадково неоднорідному середовищі

Щоб дослідити структуру ряду (9), введемо графічне зображення його елементів у вигляді діаграм Р. Фейнмана

$$G(\vec{r}\,',\vec{r}\,'',t',t'')\sim\overset{(\vec{r}',t')}{\bullet}\!\!\!-\!\!\!-\!\!\!\overset{(\vec{r}'',t'')}{\bullet}$$

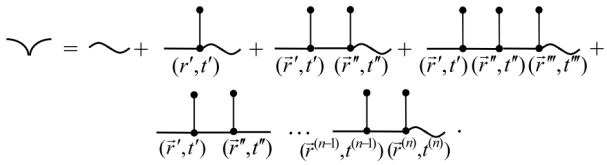
Оператору $L_s(\vec{r}\,',t')$ співставимо вертикальний відрізок з крапками на кінцях

$$L_s(\vec{r}\,',t')\sim\overset{(\vec{r}',t')}{\bullet}\!\!\!\mid\;.$$

Функціям випадкового поля концентрації $c(\vec{r},t)$ та поля концентрації в однорідному тілі $c_h(\vec{r},t)$ співставимо діаграму-галочку та хвилясту лінію відповідно



Тоді ряд (9) у графічному представленні набуде такого вигляду



Усереднимо випадкове поле концентрації (9) за ансамблем конфігурацій фаз. Зауважимо, що за означенням кореляційна функція дорівнює

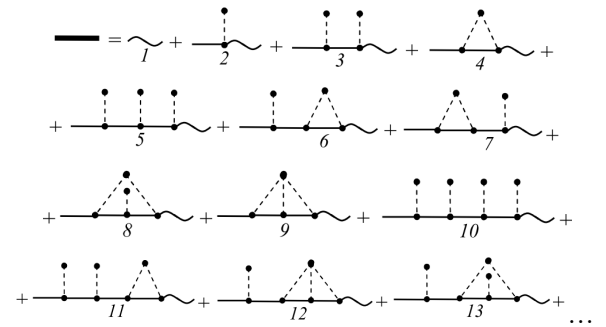
$$\psi_c(\vec{r}_1,\vec{r}_2,t)\equiv\left\langle c(\vec{r}_1,t)c(\vec{r}_2,t)\right\rangle-\left\langle c(\vec{r}_1,t)\right\rangle\left\langle c(\vec{r}_2,t)\right\rangle. \quad (34)$$

Співставимо кумулянтній функції ψ_k пунктирні лінії, причому її порядок співпадає з порядком діаграми



Введемо позначення для усередненого поля

Для усередненого розв'язку отримаємо ряд



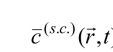
(10)

Зазначимо, що відповідність між діаграмами Фейнмана та аналітичними виразами є взаємно однозначною.

Деякі з діаграм, що входять у (10), містять в якості фрагментів діаграми нижчого порядку. Цим можна скористатися для скорочення запису. Суму ряду (10) виразимо через суму деякої нескінченної підпослідовності цього ж ряду. Для цього класифікуємо діаграми, що входять у (10) [9].

Діаграма називається слабко зв'язаною, якщо її можна розділити на дві окремі діаграми, розірвавши деяку одну лінію G. У формулі (10) слабко зв'язаними є діаграми *3, 5-7, 10-13*. Решта діаграм є сильно зв'язаними (*1, 2, 4, 8, 9*). Діаграми, що отримуються внаслідок розриву ліній G, в свою чергу можуть виявитися сильно або слабко зв'язаними. Якщо серед «вторинних» діаграм є слабко зв'язані, то їх можна розбити на простіші діаграми. Продовжуючи цю процедуру, в результаті прийдемо до деякої кількості сильно зв'язаних діаграм. Число сильно зв'язаних діаграм, на які може бути розбита слабко зв'язана діаграма, є показником зв'язності вихідної діаграми. Для сильно зв'язаних діаграм приймемо показник зв'язності 1.

У ряді (10) відберемо всі сильно зв'язані діаграми, тобто такі, які неможливо розділити на дві окремі діаграми, розірвавши одну лінію G. Оскільки кожна з діаграм починається лінією G і закінчується хвилястою лінією c_h, то суму всіх сильно зв'язаних діаграм можна подати у вигляді

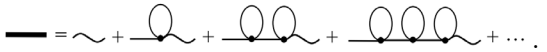


Тут ядро масового оператора можна подати в графічній формі

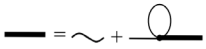


(11)

Групуємо суми всіх сильно зв'язаних діаграм з однаковим показником зв'язності. Тоді можна подати усереднене поле концентрації як діаграмний ряд



Ряд (11) є розв'язком рівняння Дайсона



(12)

або, в аналітичній формі

$$\left\langle c(\vec{r},t)\right\rangle = c_h(\vec{r},t)+\int_0^t\int_{(V)} G\Sigma\left\langle c\right\rangle d\vec{r}'dt'. \quad (12a)$$

В загальному випадку оператор, а в частковому - функція, $\Sigma(\vec{r},t)$ точно невідомий. В наближеному випадку, наприклад, в якості цього оператора можна використати суму декількох перших членів ряду (11). У випадку наближення Бурре [9] маємо



(13)

Застосуємо до рівняння Дайсона (12) оператор $L_0(\vec{r},t)$. Тоді отримаємо

$$\left[\rho_0\frac{\partial}{\partial t}-d_0\Delta-\Sigma(\vec{r},t)\right]\left\langle c(\vec{r},t)\right\rangle=0. \quad (14)$$

Для наближення Бурре (13) рівняння (14) набуде вигляду

$$\rho_0\frac{\partial\left\langle c(\vec{r},t)\right\rangle_B}{\partial t}-d_0\Delta\left\langle c(\vec{r},t)\right\rangle_B-\left\langle L_s(\vec{r},t)\right\rangle\left\langle c(\vec{r},t)\right\rangle_B=0.$$

У випадку рівномірного розподілу N фаз одержимо рівняння для усередненого поля концентрації домішки в наближенні Бурре

$$\left[\rho_0-\sum_{j=1}^{N}v_j(\rho_0-\rho_j)\right]\frac{\partial\left\langle c(\vec{r},t)\right\rangle_B}{\partial t}-$$
$$-\left[d_0-\sum_{j=1}^{N}v_j(d_0-d_j)\right]\Delta\left\langle c(\vec{r},t)\right\rangle_B=0\cdot \quad (15)$$

Рівняння (15) разом із вихідними крайовими умовами можна розв'язати аналітично.

VI. Дифузія домішки у двофазному випадково неоднорідному шарі

Розвязок крайової задачі (15) для двофазного тіла ($N=2$) з вихідними крайовими умовами (2) знайдено у вигляді [6]

$$\left\langle c(z,t)\right\rangle_B = \tilde{c}_1\left(1-\frac{z}{z_0}\right)+\tilde{c}_2\frac{z}{z_0}-$$

$$-\frac{2}{\rho_0 z_0}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{z_n}\left(\tilde{c}_1+(-1)^{n+1}\tilde{c}_2\right)e^{\frac{[d_0-v_1(d_0-d_1)]z_n^2 t}{\rho_0-v_1(\rho_0-\rho_1)}}\sin(z_n z)\,.$$

Проілюструємо розподіли усередненої концентрації домішкових частинок, що мігрують в двофазному шарі. Числові розрахунки проводились у безрозмірних змінних [10]

$$\xi = z/z_0\,,\quad \tau = dt/\rho z_0^2\,.$$

У якості базових використано такі значення параметрів: $\rho_0=1$, $\rho_1=1.1$, $d_0=1$, $d_1=0.5$ і 1.5, $v_1=0.1$, $\xi_0=1$, $\tilde{c}_1=1$, $\tilde{c}_2=0.05$.

Рис. 1 ілюструє розподіли усередненої за ансамблем конфігурації фаз концентрації $\left\langle c(\xi,\tau)\right\rangle/\tilde{c}_1$ (криві a, суцільні лінії), концентрації в шарі з усередненими за об'ємом характеристиками (криві b, штрих-пунктирні лінії) і концентрації в однорідному шарі з характеристиками матриці (криві c, штрихові лінії) в моменти часу $\tau=0.01$ (криві 1), $\tau=0.05$ (криві 2) і $\tau=0.25$ (криві 3). Тут і надалі, якщо не зазначено інше, рис. a побудовані для $d_1=0.5$, а рис. b для $d_1=1.5$

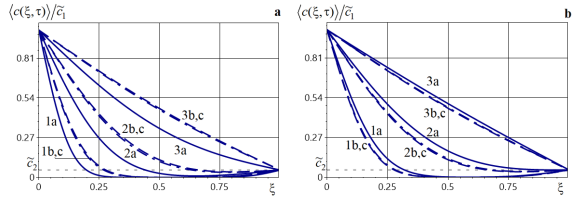


Рисунок 1. Розподілі усередненої концентрації дифундуючих частинок для різних моделей в різні моменти безрозмірного часу для $d_1=0.5$ (a) та $d_1=1.5$ (b)

Зазначимо, що застосування моделі дифузії домішок для розрахунку усередненої за ансамблем конфігурацій фаз концентрації у двофазному шарі з рівномірним розподілом фаз у тілі призводить до результатів, відмінних від отриманих з використанням моделей дифузії з характеристиками матриці, чи усередненими за об'ємом (рис. 1). Зі збільшенням часу протікання процесу дифузії функції концентрації за всіма моделями зростають, доки не вийдуть на стаціонарний режим (криві 3b,c на рис. 1a і криві 3a на рис. 1b), причому різниця між ними зменшується.

VII. Висновки

Отже проведено моделювання процесу масоперенесення частинок домішки у багатофазному випадково неоднорідному тілі. На міжфазних границях задано неідеальні умови контакту щодо концентрації домішкової речовини. На основі рівняння балансу маси для усього тіла отримано стохастичне диференціальне рівняння масоперенесення домішки для тіла в цілому, оператор якого містить стрибки шуканої функції та її похідної на випадкових міжфазних границях.

Отриманій крайовій задачі поставлено у відповідність інтегро-диференціальне рівняння з випадковим ядром, розв'язок якого побудований у вигляді інтегрального ряду Неймана. Для дослідження структури цього ряду введено графічне зображення його елементів у вигляді діаграм Р. Фейнмана. Проведено усереднення випадкового поля концентрації за ансамблем конфігурацій фаз. З використанням топологічних ознак діаграм усереднений ряд Неймана виражено через суму певної нескінченної підпослідовності цього ж ряду. Запропоновано класифікацію діаграм з групуванням на сильно- і слабко- зв'язані діаграми. Ядро масового оператора побудовано на основі суми всіх сильнозв'язаних діаграм.

Використання техніки діаграм Фейнмана дозволило отримати інтегро-диференціальне рівняння Дайсона для усередненого поля концентрації. Сконструйовано спрощений оператор рівняння Дайсона у випадку наближення Бурре. Диференціальне рівняння на усереднене поле концентрації сконкретизовано для випадку N фаз, рівномірно розподілених в області тіла.

Література

[1] Budzik, K.; Gaiotto, D.; Kulp, J.; Wu, J.; Yu, M. Feynman diagrams in four-dimensional holomorphic theories and the operatope. J. High Energy Phys. 2023, 7, 127. https://doi.org/10.1007/JHEP07(2023)127

[2] Sidler, D.; Hamm, P. A Feynman diagram description of the 2D-Raman–THz response of amorphous ice. J. Chem. Phys. 2020, 153, 044502. https://doi.org/10.1063/5.0018485

[3] Ananthanarayan, B.; Das, A.B.; Wyler, D. Hopf algebra structure of the two-loop three-mass nonplanar Feynman diagram. Phys. Rev. D 2021, 104, 076002. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.076002

[4] Pukach, P.; Chernukha, O.; Chernukha, Y.; Vovk, M. Three-Dimensional Mathematical Modeling and Simulation of the Impurity Diffusion Process Under the Given Statistics of Systems of Internal Point Mass Sources. *Modelling* 2025, *6*, 23. https://doi.org/10.3390/modelling6010023

[5] Pukach, P.; Chernukha, Y.; Chernukha, O.; Bilushchak, Y.; Vovk, M. Mathematical modeling of impurity diffusion processes in a multiphase randomly inhomogeneous body using Feynman diagrams. Symmetry 2025, 17, 920. https://doi.org/10.3390/sym17060920

[6] Crank, J. The Mathematics of Diffusion, 2nd ed.; Clarendon Press: Oxford, UK, 1975.

[7] Münster, A. Chemische Thermodynamik; De Gruyter: Berlin, Germany, 1970

[8] Chaplya, E.Y.; Chernukha, O.Y.; Pelekh, P.R. Mathematical modeling of heat-conduction processes in randomly inhomogeneous bodies using Feynman diagrams. J. Math. Sci. 2009, 160, 503–510.

[9] Rytov, S.M.; Kravtsov, Y.A.; Tatarskii, V.I. Principles of Statistical Radiophysics 2: Correlation Theory of Random Processes; Springer: Berlin, Germany, 1988.

[10] Wladimirov, V. Gleichungen der Mathematischen Physik; Deutscher Verlag der Wissenschaften: Berlin, Germany, 1972.

СЕКЦІЯ 7

РОБОТОТЕХНІКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КЕРУВАННЯ

MCIT
Modeling, control & information technologies

Enhancing the Efficiency of the Military Environmental Security System through the Implementation of Advanced Technical Means

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.108

Ramil Akhundov
Professor at National Defence University
ORCID ID: 0009-0001-8798-8044
Baku, Azerbaijan
mr.axundov1@gmail.com

Elshan Hashimov
Professor at Azerbaijan Technical University
ORCID ID: 0000-0001-8783-1277
Baku, Azerbaijan
hasimovel@gmail.com

Abstract - The modernization of environmental security systems in the armed forces is a critical step toward ensuring operational safety under radiation and chemical threat conditions. This paper presents a framework for enhancing system efficiency through the integration of advanced technical means, including robotics, unmanned aerial vehicles (UAVs), distributed sensor networks, artificial intelligence (AI), and digital modeling technologies. The proposed methodology evaluates efficiency using a quantitative coefficient $\eta = (A \times R \times C) / (Tr \times E)$, which reflects improvements in accuracy, reliability, coverage, response time, and resource utilization. Results demonstrate that the introduction of these technologies increases overall system efficiency by 1.8–2.3 times compared to conventional approaches, reducing detection time by up to 50% and improving analytical accuracy by approximately 30%. The paper outlines an implementation roadmap that includes pilot testing, large-scale integration, and doctrinal adaptation. The findings confirm that innovation-driven modernization creates a more responsive, resilient, and data-driven environmental security system, capable of sustaining ecological and operational safety in both peacetime and combat environments.

Keywords - environmental security, armed forces, radiation safety, chemical safety, robotics, UAV, AI, sensor networks, digital twins, efficiency.

I. Introduction

Modern military operations increasingly intersect with environmental risks, where radiation and chemical threats remain among the most dangerous due to their persistence, invisibility, and potential to spread over wide areas. Ensuring environmental security in the armed forces has therefore become not only an ecological task but also an essential component of overall force protection and operational stability. However, the effectiveness of existing systems for radiation and chemical safety remains limited by technological and organizational constraints—manual data collection, slow analysis, and low situational awareness.

The rapid advancement of science and engineering offers new opportunities to strengthen environmental security systems through the introduction of innovative technical means. Modern robotics, unmanned aerial vehicles (UAVs), distributed sensor networks, artificial intelligence (AI), and digital twins allow for faster detection, more accurate risk assessment, and automated decision support. These technologies form the basis of a new generation of environmental protection infrastructure that can operate continuously, integrate multi-source data, and provide commanders with reliable, real-time information.

The objective of this study is to develop a conceptual and analytical framework for increasing the efficiency of the military environmental security system through the implementation of advanced technical tools. The paper identifies key technological drivers, proposes quantitative efficiency indicators, and outlines how modern innovations can improve monitoring, analysis, and response capabilities under radiation and chemical hazard conditions.

II. Background and Related Work

Research on improving environmental security in the armed forces traditionally focuses on radiation, chemical, and biological protection systems that rely on specialized reconnaissance vehicles, portable detectors, and laboratory analysis. While these methods remain effective for localized monitoring, they are slow to react and limited in spatial coverage [1-5]. Over the past decade, many defense organizations have begun integrating innovative technologies to overcome these limitations, emphasizing automation, real-time data fusion, and autonomous operation.

International projects such as DARPA SIGMA+ (USA), NATO CBRN Defence Capability Development, and the European SensorNet initiative have demonstrated the potential of wide-area sensor networks, cloud-based analytics, and AI-driven risk forecasting. In parallel, military robotics and UAVs equipped with radiation and chemical sensors have proven their effectiveness in reconnaissance, contamination mapping, and sample collection without exposing personnel to direct danger [6-10,35]. In Russia, China,

and several EU countries, experiments with robotic platforms and micro-sensor systems have shown a reduction in detection time by up to 40–60% compared with traditional manual methods [11,12,27].

Despite these advances, significant challenges remain. Many systems still operate as isolated subsystems with weak interoperability, limited cyber protection, and insufficient data validation. Integration of heterogeneous sensors, standardized data formats, and secure communication protocols remains a key research problem [13-17]. Current studies also note the need for new efficiency models that can quantify the contribution of innovative technologies to the reliability, accuracy, and responsiveness of environmental monitoring. The present paper builds upon these findings, focusing on how advanced technical means, particularly robotics, UAVs, IoT networks, and AI analytics, can systematically enhance the performance and resilience of military environmental security systems.

III. Methodology: Efficiency Evaluation Framework

To assess how modern technical innovations improve the performance of the environmental security system in the armed forces, an integrated efficiency evaluation framework is proposed. The framework quantifies how technological upgrades influence detection speed, accuracy, reliability, coverage, and resource consumption — the key operational parameters that determine system readiness under radiation and chemical threat conditions.

The efficiency of the system is represented by a dimensionless coefficient η (eta), which combines these factors into a single measure:

$$\eta = \frac{A \; x \; R \; x \; C}{T_r \; x \; E}$$

where A is detection accuracy, R is reliability (mean time between failures or data validity rate), C is spatial coverage of monitoring, T_r is system response time, and E represents energy or resource consumption. A higher η indicates a more efficient environmental security system capable of rapid and stable performance under limited resources.

To evaluate the impact of advanced technologies, a comparative approach is applied. Baseline performance metrics are established for conventional systems—manual sampling, vehicle-based reconnaissance, and laboratory analysis. These values are compared to experimental or simulated data from systems enhanced by robotics, UAV sensor platforms, distributed IoT detectors, and AI-based analytics. Improvement ratios (Δη) are calculated to show relative gains in speed, accuracy, and operational endurance.

Efficiency assessment also includes modeling of information flow and resource usage within the system. Simulation experiments are conducted to estimate how real-time data processing, sensor network density, and communication reliability affect total mission effectiveness [18-20]. Statistical analysis is used to determine confidence levels for each performance indicator, while sensitivity analysis identifies which technological parameters yield the greatest contribution to overall efficiency.

Finally, the methodology incorporates reliability modeling based on k-out-of-n system structures, where operational success depends on the functioning of at least k out of n deployed subsystems (e.g., sensors, UAVs, or robots). This approach allows for evaluation of redundancy and resilience against partial failures. The resulting framework provides a quantitative basis for decision-makers to prioritize technological investments and optimize the configuration of environmental monitoring assets within the armed forces.

IV. Advanced Technical Means for Environmental Security

Enhancing the environmental security system of the armed forces requires the integration of advanced technical means that improve the accuracy, responsiveness, and resilience of monitoring and response operations [21-25, 40]. Modern technologies enable continuous surveillance, autonomous data collection, and real-time analytics, reducing dependence on manual procedures and increasing situational awareness. The most promising directions include robotics, unmanned aerial systems, distributed sensor networks, artificial intelligence, and secure communications.

Robotic complexes equipped with radiation and chemical detectors provide autonomous or remotely controlled reconnaissance in contaminated or high-risk zones. They are capable of measuring radiation dose rates, collecting soil and air samples, and transmitting data to command centers without exposing personnel to danger. Such systems significantly reduce operational risk and extend mission duration under extreme conditions [26,27,39].

Unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with miniaturized spectrometric and chemical sensors expand monitoring coverage over large areas. UAVs can map contamination zones, estimate concentration gradients, and detect sources of emission using real-time geospatial analytics. Integration with ground-based posts allows rapid validation of anomalies detected from the air and immediate tasking of reconnaissance units [28,29, 40].

Distributed sensor networks (IoT) form the backbone of continuous environmental monitoring. Networks of stationary and mobile sensors—linked through military communication channels—enable automatic data collection and early-warning capabilities. Smart sensors with self-diagnosis and calibration functions improve data reliability, while mesh-network topologies enhance resilience to communication failures [30-33,37].

Artificial intelligence and machine learning play a crucial role in data fusion, pattern recognition, and predictive modeling [34]. Neural algorithms process massive sensor datasets to detect anomalies, estimate dispersion dynamics, and forecast risk levels based on meteorological and topographic data. AI-driven decision-support modules help commanders prioritize response actions and allocate reconnaissance or decontamination resources more efficiently [35].

Digital twins and simulation models create virtual replicas of monitored territories, allowing simulation of

contamination scenarios and evaluation of response strategies [36]. This technology supports mission rehearsal, risk assessment, and optimization of environmental safety protocols before real-world deployment.

Secure communication and data management technologies ensure the confidentiality and integrity of information flows [37]. Encrypted telemetry, synchronized timing, and automated integrity verification prevent data spoofing and support reliable decision-making under electronic warfare or cyberattack conditions.

Together, these advanced technical means transform the environmental security system into an intelligent, adaptive infrastructure that operates continuously, learns from data, and supports proactive decision-making. Their integration forms the foundation for an eco-secure digital ecosystem within the armed forces, capable of maintaining operational readiness even under complex radiation and chemical threat environments.

V. RESULTS AND DISCUSSION

Implementation of advanced technical means within the military environmental security system demonstrates measurable improvements in speed, precision, and reliability of monitoring and response processes. Simulation modeling and experimental comparisons reveal that automation and data integration substantially reduce the detection-to-decision time while maintaining high measurement accuracy and system stability under stress conditions.

The results show that replacing manual sampling and vehicle-based reconnaissance with robotic and UAV systems decreases the average detection time by 35–50% and expands the monitoring radius by up to 60%. Autonomous data transfer and online visualization also shorten the decision-making cycle, allowing command centers to react to radiation or chemical anomalies in near real time. Meanwhile, distributed sensor networks increase spatial coverage and reduce blind zones in terrain with complex topography. When connected via secure communication channels, the system can sustain partial network failures without critical data loss, maintaining an operational availability above 99%.

Integration of artificial intelligence and machine learning modules further improves analytical efficiency. Machine learning algorithms trained on historical contamination data enhance anomaly detection accuracy by approximately 25–30% compared to threshold-based methods. Predictive dispersion models, updated with real-time meteorological data, provide more precise delineation of hazard zones, reducing forecast error margins to below 10%. The use of digital twins in simulated exercises has shown a reduction in resource consumption and personnel exposure by modeling optimal reconnaissance and decontamination routes before field deployment.

Quantitative assessment of efficiency based on the coefficient $\eta = (A \times R \times C) / (Tr \times E)$ confirms the advantage of innovation-driven systems. On average, η increases by a factor of 1.8–2.3 depending on operational conditions and technological configuration. The most significant contributors to efficiency growth are improved reliability (R) due to redundant sensor coverage, higher detection accuracy (A) through AI-based filtering, and reduced response time (Tr) achieved via autonomous operations. Efficiency improvement by technology type is shown in Fig. 1.

However, the results also highlight certain limitations. Advanced systems require substantial initial investment, continuous calibration, and well-trained operators. Cybersecurity risks increase with the number of interconnected devices, necessitating strong encryption and authentication mechanisms. Furthermore, environmental factors such as extreme weather or electromagnetic interference may degrade sensor accuracy and communication quality. Despite these constraints, the overall findings indicate that modern technical means substantially strengthen the resilience, adaptability, and efficiency of the environmental security system, turning it into a proactive and data-driven component of national defense infrastructure.

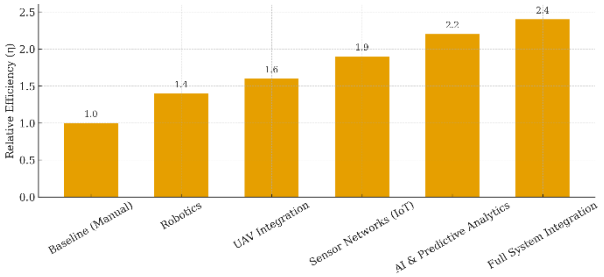


Fig. 1. Efficiency growth (η) as a function of technology adoption

Key differences in performance indicators between conventional and modernized systems are summarized in Table I.

Table I. Comparative efficiency metrics of traditional vs modernized system

Parameter	Traditional System	Modernized System (with Advanced Tech)	Improvement (%)
Detection accuracy (A)	70–75%	90–95%	+25%
Response time (Tr)	10–15 minutes	3–5 minutes	−60%
Reliability (R)	85%	98%	+15%
Spatial coverage (C)	~2–3 km radius	~8–10 km radius	+300%
Resource consumption (E)	High (manual, crewed)	Moderate (autonomous, optimized)	−40%
System efficiency (η)	Baseline: 1.0	1.8–2.4 (depending on config)	+80–140%

VI. IMPLEMENTATION ROADMAP

The transition toward a technologically enhanced environmental security system in the armed forces requires a structured, phased approach that balances innovation with operational practicality. At the first stage, pilot projects should be established at selected training ranges and military bases to test and calibrate advanced sensors, UAV reconnaissance platforms, and robotic complexes. These pilot implementations allow for validation of technical parameters, communication

stability, and data interoperability between mobile units and command centers.

The second stage involves large-scale integration and networking. Data from distributed sensors, UAVs, and robotic systems must be unified under a single environmental monitoring platform with standardized interfaces and secure communication protocols. This phase also includes the deployment of AI-driven analytical modules and digital twins to support real-time decision-making and predictive modeling.

At the third stage, full operational deployment and doctrinal adaptation are achieved. This includes updating regulations and training programs, establishing maintenance and calibration schedules, and defining legal responsibilities for data management and environmental reporting. Continuous operator training, cybersecurity reinforcement, and technical modernization cycles ensure system sustainability.

Finally, international interoperability should be considered, allowing data exchange with allied defense and civil protection systems. Through these steps, the armed forces can create a modern, efficient, and adaptive environmental security infrastructure capable of responding effectively to radiation and chemical threats in both peacetime and combat operations.

VII.CONCLUSION

The integration of advanced technical means fundamentally enhances the efficiency and resilience of the military environmental security system. Robotics, UAVs, distributed sensor networks, artificial intelligence, and digital modeling enable faster detection, higher accuracy, and autonomous decision support, reducing risks to personnel and the environment. Quantitative assessment confirms a significant improvement in key performance indicators such as response time, reliability, and data quality when compared with traditional systems. Continued modernization supported by regulatory adaptation and personnel training will allow the armed forces to maintain sustainable ecological safety and operational readiness under radiation and chemical threat conditions.

REFERENCES

[1] R. Akhundov, “Modern developments in the field of weapons of mass destruction and defence against them,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 132–133, 2024.

[2] R. G. Akhundov and E. A. Eldarov, “Special operations forces in modern conflicts,” Вестник науки и образования, no. 6(149), pp. 16–20, 2024.

[3] R. Akhundov, “The environmental impact of military activities,” ResearchGet, 2024. [Online]. Available: ResearchGet. [Accessed: Oct. 4, 2025].

[4] R. Akhundov and I. Islamov, “Innovative technologies for radiation and chemical protection in the armed forces,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (June 6, 2025; Bologna, Italy), pp. 247–255, 2025.

[5] R. Akhundov and I. Islamov, “Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments,” Матеріали конференцій МЦНД, (30.05.2025; Київ, Україна), pp. 321–329, 2025.

[6] R. G. Akhundov and A. M. Talibov, “Environmental safety as a component of national security,” in The Latest Technologies – for the Protection of Airspace: Abstracts of the 20th Int. Sci. Conf. of Kharkiv National University of the Air Force Named After Ivan Kozhedub, Kharkiv, Ukraine, May 2–3, 2024, pp. 25–27.

[7] Р. Г. Ахундов, “Построение экспериментальных изотерм адсорбции образцами угленаполненного химзащитного субстрата,” Наука, техника и образование, no. 10(63), pp. 16–20, 2019.

[8] Р. Г. Ахундов, А. Г. Ахмедова, Ш. Д. Даньялов, и И. И. Мустафаев, “Радиационно-стимулированные процессы получения активного угля,” Санкт-Петербург, vol. 25, no. 1, p. 47, 2020.

[9] R. Akhundov and D. Sh., “The use of modified activated coal in sorption of carbon-monoxide,” in Materials of the Int. Sci.-Practical Conf. “Radiation and Chemical Safety Problems”, Baku, Nov. 2019, pp. 161–162.

[10] R. Akhundov, “Ecocide in the Nagorno-Karabakh conflict: an analysis of Armenia’s environmental impact on Azerbaijan,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools. Abstracts of the 14th Int. Sci. and Tech. Conf., Kharkiv, Ukraine, vol. 2, pp. 95–96, Apr. 2024.

[11] R. Akhundov and I. Islamov, “Operational modes of environmental security systems in the armed forces facing radiation and chemical threats,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (Aug. 22, 2025; Bern, Switzerland), pp. 103–111, 2025.

[12] R. Q. Axundov, “Azərbaycan Ordusunda radiasiya, kimyəvi və bioloji kəşfiyyatın xüsusiyətləri,” in 4-cü Sənaye İnqilabı və İqtisadiyyatın Rəqəmsallaşdırılması: Beynəlxalq Elmi Konfransın Materialları, pp. 104–108, 2023.

[13] R. Akhundov and I. Islamov, “Innovative technologies for enhancing environmental security in armed forces under radiation and chemical threats,” Матеріали конференцій МЦНД, (15.08.2025; Харків, Україна), pp. 141–150, 2025.

[14] R. Akhundov and I. Islamov, “Comprehensive approach to establishing operational modes of environmental security systems in military forces under radiation and chemical hazards,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (Aug. 8, 2025; Liverpool, UK), pp. 108–116, 2025.

[15] R. Akhundov, “Application of innovative technologies for the decontamination and neutralization of radiological and chemical hazards in military environments,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (Aug. 1, 2025; Seoul, South Korea), pp. 107–115, 2025. doi: 10.36074/logos-01.08.2025.017.

[16] R. Akhundov and I. Islamov, “Exploring the potential, challenges, and future of robots and autonomous systems in warfare,” Матеріали конференцій МЦНД, (18.07.2025; Тернопіль, Україна), pp. 117–126, 2025.

[17] R. Akhundov, “Advancements in monitoring radiation and chemical hazards for military environmental safety,” Матеріали конференцій МЦНД, (04.07.2025; Ужгород, Україна), pp. 89–97, 2025. doi: 10.62731/mcnd-04.07.2025.002.

[18] S. M. Babayev et al., “The impact of new technologies on the progress of military art,” in Proc. Int. Sci. and Practical Conf., vol. 6, pp. 54–56, 2024.

[19] A. Talibov et al., “Environmental safety of nanomaterials application,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 55–56, Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala, 2024.

[20] R. Akhundov and E. Hashimov, “The impact of new technologies on enhancing the efficiency of armed,” Матеріалы конференцій МЦНД (13.06.2025; Lutsk, Ukraine), pp. 186–195, 2025.

[21] R. Akhundov and E. Hashimov, “The environmental impact of war: Effects, challenges, and solutions,” Матеріали конференцій МЦНД (27.06.2025; Dnipro, Ukraine), pp. 103–112, 2025.

[22] A. M. Talibov et al., “The use of unmanned aerial vehicles for monitoring chemical and radiation contamination,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 4, pp. 88–89, 2025.

[23] R. Q. Axundov, “Azərbaycan Ordusunda ekoloji təhlükəsizliyin təşkili və təkmilləşdirilməsi,” Hərbi Bilik, no. 4, pp. 7–15, 2024.

[24] A. M. Talibov et al., “Modeling and forecasting radiological and chemical threats in the military sphere,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 120–121, 2025.

[25] A. M. Talibov et al., “Application of biotechnology to mitigate the consequences of radiological and chemical contamination,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 86–87, 2025.

[26] A. R. Jabrayilov et al., “Development of a comprehensive environmental protection system for military facilities,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 4, pp. 82–83, 2025.

[27] A. Jabrayilov et al., “Digital technologies and artificial intelligence in the management of environmental safety in the army,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 110–111, 2025.

[28] A. M. Talibov et al., “Training military personnel in radiation and chemical threat protection methods,” in Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 4, pp. 94–95, 2025.

[29] A. R. Jabrayilov et al., “Experience of international cooperation in the field of military environmental safety,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 116–117, 2025.

[30] A. R. Jabrayilov et al., “Prospects for creating closed ecological life support systems,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 4, pp. 92–93, 2025.

[31] A. R. Jabrayilov et al., “The role of environmental monitoring in ensuring the safety of military units,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 128–129, 2025.

[32] A. Talibov et al., “The main anthropogenic sources of atmospheric pollution,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 53–54, Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala, 2024.

[33] R. Mammadov et al., “Enhancing special forces management efficiency in modern operations,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 31–32, 2024.

[34] S. Babayev et al., “Prospects for the application of nanotechnology in the military sector,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 14–15, 2024.

[35] I. Islamov et al, “Integrating environmental security into defense strategy with a focus on radiological and chemical risks,” Strategic directions of science development: Factors of influence and interaction: Collection of scientific papers with materials of the VII International Scientific Conference, Cherkasy, Ukraine, Sept. 26, 2025, pp. 115–125. doi: 10.62731/mcnd-26.09.2025.

[36] R. Akhundov and I. Islamov, “Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments,” Матеріали конференцій МЦНД, (30.05.2025; Київ, Україна), pp. 321–329, 2025.

[37] R. Akhundov and I. Islam, “Ensuring environmental safety in military activities considering radiological and chemical protection,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (May 23, 2025; New York, USA), pp. 175–182, 2025.

[38] E. V. Mammadov et al., “Development of multilayered protection systems against chemical, radiological, and biological hazards for military personnel,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 112–113, 2025.

[39] R. Akhundov, “Establishing a global system for radiation and chemical security monitoring: importance and opportunities for international cooperation,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (July 4, 2025; Zurich, Switzerland), pp. 121–127, 2025.

[40] A. H. Hasanov et al., “Scientific and technological progress or environmental safety,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 22–23, 2024.

MCIT Modeling, control & information technologies

GPRS Radio Communication For AI-Based Measurement And Control Complex

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.109

Azad Bayramov
Republican Seismic Survey Center
Baku, Azerbaijan
azad.bayramov@yaho.com

Samir Suleymanov
Republican Seismic Survey Center
Baku, Azerbaijan
ofis.setm@gmail.com

Abstract— **This paper presents the results of development of the GPRS radio communication modem for an autonomous measurement and control complex based on Artificial Intelligence. The complex is designed for simultaneous measurement of the concentration level of radioactive radon gas in the near-surface layer, the level of the Earth's magnetic field intensity with simultaneous analysis of seismic processes in the territory of Azerbaijan and neighboring regions. while measuring the magnetic field strength, solar activity is simultaneously analyzed. GPRS radio communication modem was developed to ensure communication with the Internet, to apply the machine learning method and communicate with the center. The purpose of the development and research is to study the correlations of measured values with seismic activity. A software algorithm has been developed to control the complex and carry out measurements.**

Keywords— radio communication; control complex; Artificial Intelligence; functional architecture; diagnostic commands

I. Introduction

The study of seismic activity and the identification of its relationships with parameters measured on the Earth's surface is an important task in seismology. Over the past decades, scientists have attempted to develop methods for predicting earthquakes. Particular attention is paid to the search for precursors, among which radon anomalies and magnetic field variations stand out as potentially significant. In addition, growing computing power and the development of artificial intelligence methods open up new possibilities for analyzing complex multifactorial data [1].

Current research highlights the need for complex systems capable of collecting, processing and interpreting information in real time. This is especially relevant for regions with high seismic activity, such as the Caucasus region. The development of autonomous systems capable of operating in remote and hard-to-reach areas is becoming a key area of modern seismology. Such systems allow real-time monitoring without human intervention, minimizing risks and increasing response speed.

The concentration of radioactive radon gas and the intensity of the Earth's magnetic field are taken as the measured physical quantities. Therefore, at the first stage, only two types of detectors were developed: for radon gas and the Earth's magnetic field.

The developed complex consists of detector units, an interface, a control unit, an Internet channel unit, a unit for receiving data from a seismic center, a unit for receiving data on the current state of solar activity, an analysis unit based on Artificial Intelligence and decision making, and an autonomous power supply unit on solar panels. The detector units include a radon radioactive gas detector and magnetometer devices to measure the magnetic field strength in a given area.

It is known that solar activity has a strong impact on the Earth's magnetic field. Therefore, when studying the state of the magnetic field, its correlation with solar activity should be taken into account [3].

II. AI-Based Complex For Measurement And Control

The concentration of radioactive radon gas and the intensity of the Earth's magnetic field are taken as the measured physical quantities. Therefore, at the first stage, only two types of detectors were developed: for radon gas and the Earth's magnetic field [4].

The developed complex consists of detector units, an interface, a control unit, an Internet channel unit, a unit for receiving data from a seismic center, a unit for receiving data on the current state of solar activity, an analysis unit based on Artificial Intelligence and decision making, and an autonomous power supply unit on solar panels [5,6]. The detector units include a radon radioactive gas detector and magnetometer devices to measure the magnetic field strength in a given area.

It is known that solar activity has a strong impact on the Earth's magnetic field. Therefore, when studying the state of the magnetic field, its correlation with solar activity should be taken into account [3].

In simplified form, the algorithm of the software for control and analysis of the complex consists of the

following main blocks interacting with each other. This algorithm is shown in Figure 1.

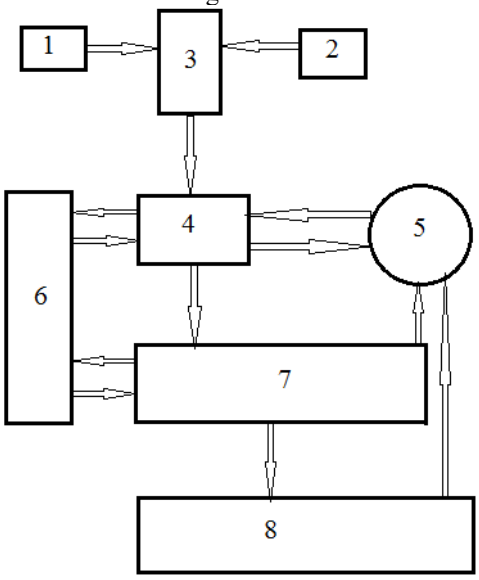


Figure 1. Simplified diagram of the algorithm of the software for control and analysis of the complex.

There are next units (blocks) in Figure 1:
- unit 1 for receiving, filtering and processing data on radon concentration on the earth's surface and at a depth of 1-3 meters;
- unit 2 for receiving data from a magnetometer;
- unit 3 for analyzing and filtering data from units 1 and 2;
- unit 4 for joint analysis of data from unit 3 and data coming from seismic center 5 and solar activity;
- unit 6 for GPRS radio communication modem;
- unit 7 for processing and in-depth analysis of data from unit 4 based on the Machine Learning method using the Internet channel and the Seismic Center database;
- unit 8 for analysis and decision-making based on the output data of unit 7.

III. GPRS Radio Communication Modem

GPRS radio communication modem provides wireless data transmission, voice communication over the GSM network, text messaging (SMS) and packet data transmission based on GPRS technology.

The presented circuit diagram reflects the functional architecture of a communication module based on the GSM/GPRS SIM900 chip.

1) The main SIM900 chip (U4).

The central element of the circuit is the SIM900A integrated circuit - a communication chip that supports quad-band GSM networks and provides interaction with an external microcontroller via a UART interface:

- The UART module is connected to the microcontroller via (Tx, Rx) signals;
- PWKEY, STATUS, NETLIGHT control lines are used to control and visually monitor the operating mode of the modem.

2) SIM card interface (U9).

The SIM card connection is placed in a separate interface block. This interface includes the following signals:

- SIM_VDD – power line,
- SIM_RST – reset signal,
- SIM_CLK – clock signal,
- SIM_DATA – duplex data line,
- SIM_PRE – presence signal.

3) These lines are connected to the SIM card tray through protective resistors and TVS diodes in series, protecting them from both electromagnetic influence and static charge.

4) Power cycle.

The module is powered by an LDO stabilizer type MIC29302WU. The use of this stabilizer allows you to reduce the voltage of 5 V to 4 V required for SIM900.

- Filtering of high-frequency pulses is ensured by the use of electrolytic and ceramic capacitors (100 µF and 100 nF) at the input and output;
- The power circuitry protects the module from current peaks and can provide the ~2A instantaneous current required during GPRS data transfer.

To monitor the operating modes of the module, two main LEDs are used:
- STATUS LED – displays the general operating status of the module,
- NETLIGHT LED – indicates the registration status in the GSM network.

Both LEDs are controlled by NPN transistors (BC547B), which isolate the signal lines from the voltage level in the module, increasing reliability.

The PWKEY signal is controlled by a transistor switch to turn the module on and off using software. This approach is effective both in automated systems and in devices that require energy conservation.

The RF output of SIM900 is connected to the GSM network via the external SMA antenna connector (RF1). The antenna unit ensures stable reception and transmission of the module signal.

The developed circuit diagram is distinguished by a stable power supply, SIM card interface protection mechanisms, operating mode control via LED indicators and GPRS functionality. This solution is suitable for widespread use in data acquisition and remote monitoring systems, IoT devices and wireless control applications.

SIM900 is a GSM/GPRS module developed by SIMCom. Through this module, microcontrollers can connect to the cellular network and perform the following functions:

- Making and receiving calls;
- Send and receive SMS;
- Connect to the Internet via GPRS (2G);
- Data transmission via TCP/IP protocol.

B. Main technical characteristics:

- Network support: GSM 850/900/1800/1900 MHz (quad-band)
- Supply voltage: 3.2 – 4.8 V (optimal 4.0 V)
- Current consumption of electric current:
  - Standby mode: ~10 mA;
  - During a conversation: ~250 mA;
  - Peak current: up to 2 A.
- Controlled by AT commands (via UART).
- UART interface: data transfer rate is in range of 9600 ÷ 115200 baud.

Dimensions: approximately 24x24 mm (the chips themselves), and the modules (boards) are approximately 40x40 mm.

IV. AT Commands And Their Use For SIM900 Module

AT commands (Attention commands) are standardized text commands used to communicate with GSM/GPRS modules via UART interface. With these commands, SIM900 allows you to manage calls, SMS, GPRS Internet, TCP/IP and other services.

AT commands usually start with the AT prefix and are returned by the module as an OK (command accepted) or ERROR (command not executed) response. The main diagnostic commands are presented in Table 1.

TABLE 1. The Main Diagnostic Commands.

Commands	Explanation	Example/Answer
AT	Checks the working status of the module	Answer: OK
AT+CPIN?	Checks the status of the SIM card	Answer: +CPIN: READY
AT+CSQ	Measures the signal level (values from 0 to 31)	Answer: +CSQ: 20,0
AT+CREG?	Network registration status	Answer: +CREG: 0,1 (Upon registration)

GPRS/Internet connection

Main sequence:

1. Setting up GPRS parameters

AT+SAPBR=3,1,"CONTYPE","GPRS"
AT+SAPBR=3,1,"APN","internet"

2. Open connection

AT+SAPBR=1,1

3. Checking the connection

AT+SAPBR=2,1
+SAPBR: 1,1,"10.120.45.87"

4. Starting the HTTP service

AT+HTTPINIT
AT+HTTPPARA="CID",1

5. HTTP GET request

AT+HTTPPARA="URL","http://example.com/data"
AT+HTTPACTION=0
AT+HTTPREAD

6. HTTP POST request

AT+HTTPPARA="URL","http://example.com/post"
AT+HTTPDATA=20,5000
temperature=25&humidity=60
AT+HTTPACTION=1
AT+HTTPREAD

7. Closing the session

AT+HTTPTERM
AT+SAPBR=0,1

TCP/IP connection

SIM900 also supports direct opening of TCP/IP sockets. The list of commands is given in table 2.

TABLE 2. The list of commands.

Commands	Explanation	Example/Answer
AT+CIPSHUT	Closes the previous session.	OK
AT+CIPSTATUS	Shows TCP/IP status	Answer: STATE: IP INITIAL
AT+CSTT="internet"	Sets APN settings	Internet for Azercell
AT+CIICR	Establishes a GPRS connection	OK
AT+CIFSR	Gets an IP address	Answer: 10.12.45.23
AT+CIPSTART="TCP", "server.com","80"	Opens a TCP connection	OK / CONNECT OK
AT+CIPSEND	Sends information	GET /data HTTP/1.1
AT+CIPCLOSE	Closes the connection	OK

Figure 2 shows the developed circuit diagram of the GPRS modem.

Thus, given paper presents the results of the development and research of an autonomous (robotic) measurement control complex based on Artificial Intelligence. The complex is designed for simultaneous measurement of the concentration level of radioactive radon gas and the level of intensity of the Earth's magnetic field with simultaneous analysis of seismic processes in the territory of Azerbaijan and neighboring regions, as well as the current state of solar activity. GPRS radio communication modem was developed to ensure communication with the Internet, to apply the machine learning method and communicate with the center. A software algorithm has been developed to control the complex, carry out measurements, and analyze the obtained data using the Machine Learning method. The purpose of the development and research is to study the correlations of measured physical quantities with seismic activity.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Azerbaijan Science Foundation – Grant № AEF-BQM-BRFTF-4-2024-5(53)-06/03/2-M-03.

REFERENCES

[1] A.A. Bayramov, F.N. Abdullayev, S.S. Suleymanov, R.D. Karimova, H.N. Safarov, E.A. Rzayev Multifactor model for seismological research. Seismoprognosis observations in the territory of Azerbaijan. 2024. Vol.26, № 2, pp.28-33.

[2] S.M. Moustavi, G.C. Beroza, Deep-learning seismology. Science, 2022, Vol. 377, No. 6607.

[3] W. Lowrie 'The Effects of Solar Activity on the Geomagnetic Field', *The Earth's Magnetic Field* (Oxford, online edn, Oxford Academic, 22 June2023). https://doi.org/10.1093/oso/9780192862679.003.0007, accessed 15 July 2025.

[4] A.A. Bayramov, F.N. Abdullayev, S.S. Suleymanov, A.A. Keramova. Development of an automated radioecological station for the purpose of studying the problems of industrial waste in seismically active areas. Materials of the Republican scientific-theoretical conference on the topic "ANAS-80". Ganja. 2025. pp. 24-27.

[5] S.S. Suleymanov, A.A. Bayramov, F.N. Abdullayev Study of seismic processes using AI technology. Current directions of development of information and communication technologies and control tools. Proceedings of 15-th International Scientific and Technical Conference. Xarkov, 2025. April 24–25, Vol.1: P.47.

[6] J. Hartmann, J.K. Levy Hydrogeological and Gasgeochemical Earthquake Precursors – A Review for Application. Natural Hazards. 2005. 34, 279–304.

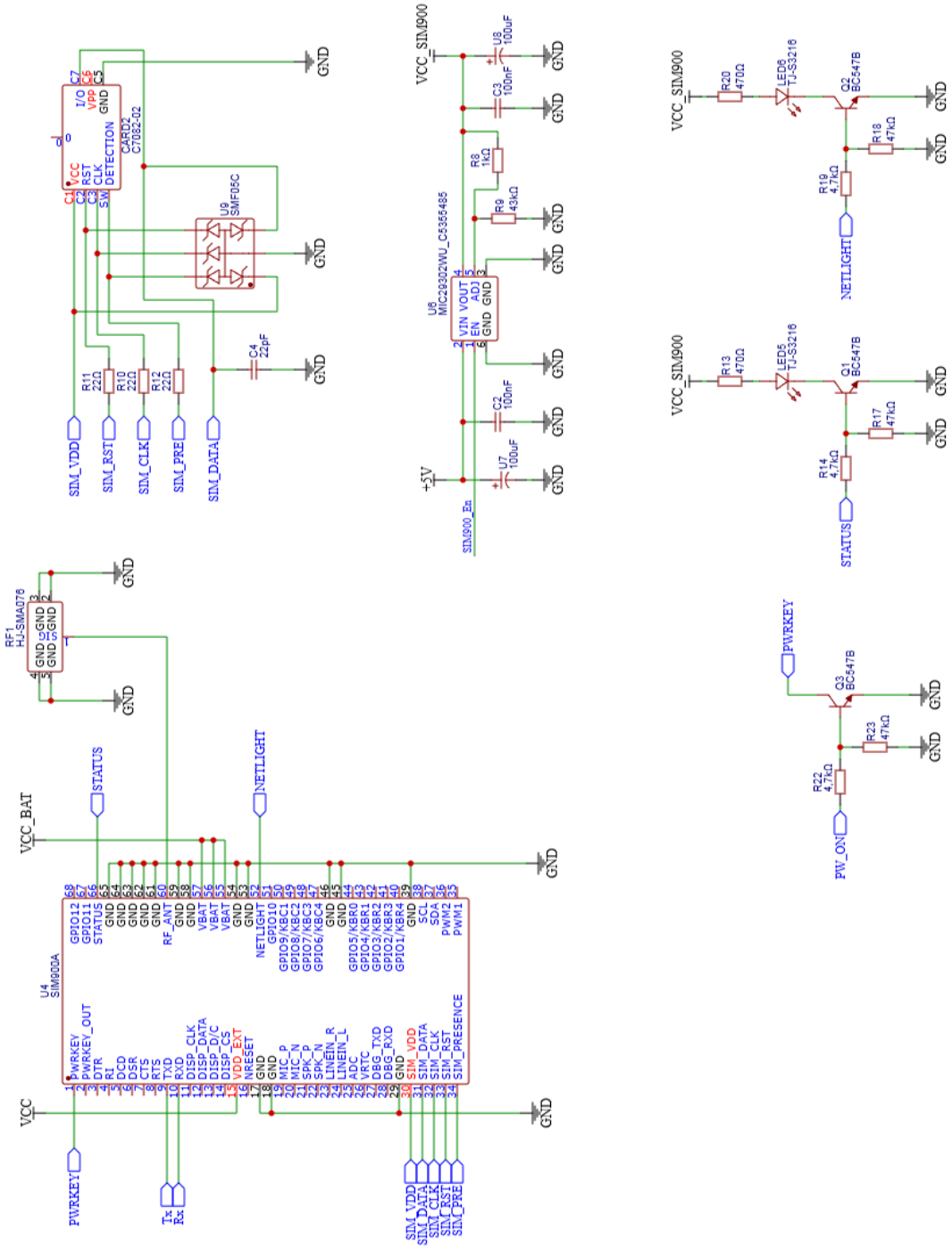


Figure 2. Schematic diagram of the GPRS modem.

Electromagnetic Testing and Failure Prediction of Antenna Systems Using Intelligent Technologies

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.110

Viktor Bondarchuk
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
barbaross2@ukr.net

Anatolii Matsui
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
matsuiam@kntu.kr.ua

Abstract— **This paper provides an analysis of the core technologies in modern wireless telecommunications, which necessitates a transformation of electromagnetic testing and diagnostic methodologies for radio-frequency components. Particular attention is given to post-production OTA methods that enable non-invasive assessment of active antenna systems under realistic operating conditions. The integration of intelligent algorithms, including machine learning and deep neural networks, is discussed as a means of enhancing defect detection efficiency and developing predictive models of failures based on the analysis of large-scale measurement data.**

Keywords—electromagnetic testing; defect detection; machine learning; neural networks

I. Introduction

Active antenna systems are increasingly important part of contemporary telecommunication networks ensuring high speed data transfer and reliability. While the development of new standards comes with growing data traffic and more stringent performance requirements, both lead to a more complex antenna array architecture [1]. In particular, the 5G networks use mmWave massive MIMO arrays containing hundreds of elements [2], which raises serious questions about measurement and diagnostics abilities.

Increasing count of ports and the miniaturization of DUTs make classic conductive testing schemes non-feasible [3], thus underlining importance to OTA measurement principles which give complete system analysis without physical connections [4], [5]. Another potentially beneficial line of research lies in the inclusion of intelligent technologies: machine learning and deep neural networks [6], [7] that enhance the accuracy for defect detection and provide predictive failure modeling capabilities [8].

II. Key Technologies of the Fifth Generation

The latest generation of wireless communication technology is standardized as 5G New Radio (NR) globally since 2018 [1]. It makes use of the millimeter-wave (mmWave) bands, particularly those within 24–40 GHz, in combination with massive MIMO techniques, enabling a significantly increased network capacity and a large coverage area [2].

Millimeter-wave (mmWave) is one of the key enabling technologies for 5G, providing enhanced peak data rates, ultra-low latency and massive connections to support self-driving cars and telemedicine applications [2]. But mmWave signals experience severe path loss and beamforming is used to focus energy and limit interference [4]. Side by side, the large MIMO arrays increase spectral efficiency and present a formidable research challenge on testing. Scaling down and large-range number of elements render conductive methods not suitable, driving towards non-intrusive OTA techniques for full characterization [9], [5].

In conclusion, though the 5G related technologies make advanced applications available more than ever before, they significantly raise the requirement of testing and diagnostic infrastructures, making OTA techniques merging with smart technology imperative for their reliable operation.

III. Classification of Testing and Fault Detection Methods

Quality of service measurement tools in next generation networks - advance testing/diagnostic infrastructure for active antenna systems A multitude of different methods are used during production to check for potential sources of error prior to commissioning. Strict control with the lowest defective appearance on each spare part, we can assure you that our quality is not only equal to but also exceeds others. Recent technological developments also allow for more automation and provide diagnostic improvements, which is especially necessary when complex designs like massive MIMO are considered [2].

Testing techniques are commonly classified according to the structure and electromagnetic. Structural methods entail optical, ultrasonic, and X-ray visual examination techniques; detection of abnormal heating employing infrared thermographic monitoring and geometric control. Even though highly suitable for the

detection of mechanical defects, it often fails to describe electromagnetic behavior of antennas.

Electromagnetic (EM) analysis offers a detailed view of the antenna performance. In the past, conductive testing has been used extensively with transceivers hardwired to measurement instruments [3]. Yet with 5G systems containing increasing miniature transceivers the guiding has become inconvenient if not unworkable. Consequently, there has been a great deal of interest in over-the-air (OTA) alternatives at distances from anechoic chambers associated with direct far-field measurements [4] to compact chamber solutions that mimic far-field conditions [5], and even near-field sampling followed by a mathematical transformation (e.g., [8]). A popular approach is the Relative Element Value (REV) method, which does not require actual wiring for amplitude and phase response measurements although impractical in large arrays as it can be time-consuming [10].

Due to the increase in amount of acquired measurement data, traditional processing approaches are unable to guarantee timely defect detection. As a result, smart technologies such as machine learning, predictive analytics and big data computation are being increasingly incorporated into OTA pipelines [6], [7]. In addition to the automated tests, they support predictive failure modeling which helps ensure more reliable 5G antenna systems.

IV. Machine Learning and Intelligent Methods in Antenna System Diagnostics

The application of neural networks to OTA testing data has become a key area in the development of antenna diagnostics. Deep neural networks (DNNs) analyzing baseband I/Q signals enable rapid and accurate identification of faulty elements in antenna arrays [3]. In Nielsen et al. (2022), it was shown that baseband signals carry sufficient information for the classification of typical failures in mmWave phased arrays.

Convolutional neural networks (CNNs) have also proven effective in radio signal analysis and antenna diagnostics. O'Shea et al. (2016) proposed CNNs for automatic modulation classification [6], while Zheng et al. (2021) applied residual CNNs to detect failures in antenna arrays [7]. These methods not only classify defects but also provide insights into their root causes.

At the same time, big data analytics enable the discovery of hidden patterns within OTA measurement datasets. Techniques such as clustering, association rule mining, and statistical modeling help uncover correlations between antenna design parameters and observed failures, serving as the foundation for building more robust diagnostic and predictive models.

A particularly important direction is predictive analytics, which leverages historical OTA testing data to forecast potential failures. Regression models, decision trees, ensemble methods, and Support Vector Regression have already shown promise in predicting faults in telecommunication systems, paving the way for predictive maintenance strategies that reduce downtime and extend equipment lifespan.

A practical demonstration of ML integration into antenna diagnostics is presented in the work of Kannan et al [11]. where a machine learning–based approach was used to detect faulty elements in phased arrays from sparse far-field measurements. This method substantially reduced diagnosis time while maintaining high accuracy, confirming the viability of ML-enhanced OTA testing pipelines.

In summary, the integration of intelligent methods into electromagnetic testing processes facilitates the transition from conventional defect detection to predictive failure modeling. This shift enhances equipment reliability, lowers maintenance costs, and aligns with the scalability requirements of modern telecommunication networks.

V. Conclutions

The study shows that 5G technologies increase antenna complexity and diagnostic demands. Traditional conductive testing is no longer practical at scale, highlighting the need for refined OTA approaches. Methods such as near-field, far-field, and REV provide essential evaluation tools. Incorporating machine learning enhances data analysis, reduces diagnostic time, and enables predictive failure management, ultimately improving reliability and efficiency in next-generation telecommunication networks.

References

[1] Sultan, A. (2022, August). 5G system overview. 3GPP. J. Clerk Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism," 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.

[2] Raj, T., Mishra, R., Kumar, P., & Kapoor, A. (2023). Advances in MIMO antenna design for 5G: A comprehensive review. Sensors, 23(14), 6329.

[3] Nielsen, M. H., Zhang, Y., Xue, C., Ren, J., Yin, Y., Shen, M., & Pedersen, G. F. (2022). Robust and efficient fault diagnosis of mm-wave active phased arrays using baseband signal. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 70(7), 5044–5053.

[4] LitePoint. (2019). LitePoint's complete guide to 5G OTA testing.

[5] 3GPP. (2020). NR base station (BS) conformance testing Part 2: Radiated conformance testing (TS 38.141-2 V15.6.0; Release 15).

[6] O'Shea, T. J., Corgan, J., & Clancy, T. C. (2016). Convolutional radio modulation recognition networks. arXiv preprint arXiv:1602.04105.

[7] Zheng, G., Zhang, Q., & Li, S. (2021). Failure diagnosis of antenna array using residual convolutional neural network. In 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium (pp. 1–2).

[8] Lin, L., Loughran, K., & Bondarchuk, V. (2024, August). OTA test and calibration of millimeter wave antenna arrays. Microwave Journal.

[9] Parini, C. G., & Gregson, S. F. (2024, November). Recent advances in compressive sensing for production test and antenna diagnostics of 5G massive MIMO antennas. Presented at the 2024 Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA).

[10] Mano, S., & Katagi, T. (1982). A method for measuring amplitude and phase of each radiating element of a phased array antenna. Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications, 65(5), 52–59.

[11] Kannan, A., Onat, N. B., Yarovoy, M. S. A., & Aslan, Y. (2025). Detection of Faulty Elements From Sparse Far-Field Data in Active Phased Arrays via Machine Learning. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation.

Features of automation of gas meter verification process using bell-provers

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.111

Oleh Huk
Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
Oleh.R.Huk@lpnu.ua

Fedir Matiko
Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
fedir.d.matiko@lpnu.ua

Pavlo Skibel
Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
pavlo.skibel.av.2022@lpnu.ua

Abstract — **This paper presents an analysis of a bell-prover used for the metrological verification of gas flow meters and gas meters, highlighting its advantages and disadvantages. Based on the analysis of scientific sources and experimental studies of reference bell-provers, it was established that these installations are the most accurate means for testing and calibrating gas meters. However, their metrological characteristics significantly depend on the operating conditions, particularly on working pressure, sealing liquid level, and ambient temperature. Variations in pressure can cause systematic errors up to 1.5%, while fluctuations in the sealing liquid level due to temperature, evaporation, or vibration can cause errors up to 0.7%. These errors can be considerably reduced through automation of gas volume reproduction and gas meter verification. The authors have proposed to improve the systems for air pressure stabilization under the bell, control of sealing liquid level to compensate for its dynamic variation, and stabilization of air temperature during meter verification.**

Keywords **— bell-prover, gas volume reproduction, automation, measurement error, dynamic changes of gas parameters, control system.**

I. Problem Statement

Accurate measurement of natural gas flow is a critical task in the power engineering, industrial, and municipal sectors. Errors in gas flow and volume measurements may result in significant economic losses and complicate financial settlements between suppliers and consumers.

Various methods and installations are used for testing and calibrating gas meters to ensure high accuracy of gas flow and volume reproduction. Among these are bell provers, piston provers, installations based on reference meters, and critical flow nozzles [1,7]. Each method has specific advantages and limitations that must be considered in metrological assurance of gas measurement instruments.

In addition, bell-prover flow-measurement installations are widely used both in Ukraine and around the world. These devices are the basis for national and international calibration laboratories, in particular in the Netherlands [8], Germany [10], and are also used by companies in many European countries, for example in Croatia [6]. In Ukraine, the national gas flow and volume standard is also based on a bell-prover installation. At Lviv Polytechnic National University, a bell-prover flow-measurement installation is used for both educational and research purposes. Therefore, improving the accuracy and efficiency of bell-provers, particularly through automation, is an urgent task that can increase the accuracy of natural gas accounting in our country.

II. Features of Bell-Prover Automation

Bell-prover reference installations are widely used for gas meter verification due to their high precision in reproducing gas volume. Their operating principle is based on displacing gas by a bell that moves downward under its own weight, generating a steady gas flow [1].

A bell-prover installation consists of the following main components:

1) gas bell – the main chamber that is immersed in the liquid; the bell must have a hard and smooth surface to ensure uniform movement [11], the dimensions of the bell depend on the flow range that needs to be reproduced;

2) a tank with a liquid into which the bell is immersed; the tank is filled with water or oil (to protect against evaporation or changes in humidity) and ensures the tightness of the volume beneath the bell; the liquid provides hydrostatic pressure that reduces gas leakage during displacement;

3) bell position measurement system; the movement of the bell (raising or lowering) is controlled by special position sensors to determine the volume of gas; modern installations commonly use digital-output position sensors that deliver precise real-time position data.

4) measuring devices: the installation must be equipped with sensors for measuring temperature, pressure and humidity, as these parameters affect the gas volume and, accordingly, the accuracy of reproducing the gas flow rate and volume; some installations use temperature and pressure compensation algorithms to ensure high measurement accuracy [12].

A schematic diagram of a free-moving bell-prover is shown in Fig. 1 [11].

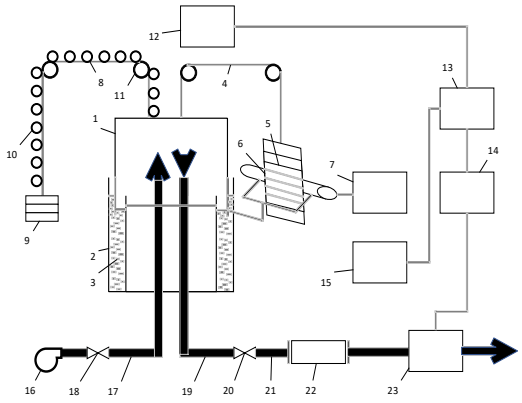


Figure 1. Schematic diagram of a free-moving bell-prover [11]: 1 – bell, 2 – liquid-filled tank, 3 – liquid, 4 – steel tape for attaching reference scale, 5 – reference scale, 6 – optoelectronic pair, 7 – microprocessor-based volume transducer, 8 – steel tape for attaching the bell, 9 – counterweight, 10 – local weights for pressure stabilization, 11 – pulley, 12 – brake clutch, 13 – torque control unit, 14 – setpoint generator for unit 13, 15 – pressure sensor beneath the bell, 16 – blower, 17 – inlet pipeline, 19 – outlet pipeline, 18, 20 – shut-off valves, 21 – test section, 22 – research flow meter, 23 – flow rate setting node

The cycle for reproducing a unit flow (volume) of gas and for verifying the gas flowmeter (meter) 22 is carried out as follows. Before testing, the required operating mode of the torque-control unit 13, which controls the brake clutch 12, is set by the setpoint generator 14. This establishes the necessary braking torque on pulley 11 of the compensation mechanism corresponding to the target gas flow and sets the required position of the throttling element in assembly 23 that defines the flow through the test section. The bell is then filled with the working gas in the following sequence:

- with valve 18 open and valve 20 closed, blower 16 feeds working gas through the inlet pipeline 17 into the space beneath the bell; this continues until bell 1 reaches its upper (raised) position;

- when the required position is reached, valve 18 is closed, the gas supply is stopped, and the bell is in a stationary, suspended state.

After that, the specified gas flow is reproduced and the flowmeter (meter) 22 is checked. To do this, the shut-off valve 20 is opened and the working gas is supplied to the test section 21. Under it's own weight bell 1 begins to slowly descend, displacing the gas through the test section 21 and the research device 22. At the same time, the displaced volume of gas is measured by the microprocessor-based control volume transducer 7, which determines volume from the displacement of the reference scale 5 relative to the optoelectronic pair 6.

Pressure in the space beneath the bell is measured by pressure sensor 15. The sensor output is sent to the input of the torque-control unit 13. When pressure decreases the braking torque is reduced, and when pressure increases the braking torque is raised. In this way a constant gas flow is maintained during the entire bell descent cycle, enabling accurate reproduction and measurement of the volume or flow. At the end of the test the shut-off valve 20 is closed, which signals completion of the cycle.

For metrological verification or calibration of gas meters, the control volume measured by the microprocessor-based volume transducer 7 is determined and compared with the volume simultaneously recorded by the research meter 22. Based on the observed discrepancies, the meter's metrological characteristics are evaluated [11].

As follows from the literature review and from the above description of the free-moving bell-prover installation [11], the main advantages of bell-prover installations are:

- high measurement accuracy and stability of the reproduced gas flow;
- capability to verify devices of various types and designs;
- wide reproducible range of flow rates and gas volumes.

The disadvantages of bell-prover installations include:

- the effect of operating pressure on the accuracy of gas flow (volume) reproduction [1]; limitations on operation at high pressures [3];
- the effect of changing the level of the sealing liquid on the calibration results [2];
- relatively large overall dimensions of the installation, special requirements for the laboratory.

To increase the accuracy of bell-prover installation's operation, various error-reduction methods are proposed, in particular the introduction of digital control systems and automation taking into account mathematical models of processes occurring during the installation's operation [3, 5, 6, 7].

From the presented analysis it is evident that bell-prover installations are high-precision instruments for reproducing gas flow and volume at pressures close to atmospheric. These installations provide a high stability of the reproduced flow. However, to achieve high accuracy and productivity, it is necessary to automate the bell-prover installations taking into account following factors.

The effect of pressure changes beneath the bell on the error of gas flow and volume reproduction is one of the key factors affecting the accuracy in bell-provers.

Studies have shown that when the measuring bell is lowered, pressure fluctuations can occur that affect the accuracy of gas volume reproduction [4]. To stabilize the pressure, it is necessary to use bell weight control systems that ensure uniform immersion and reduce hydrodynamic resistance [3, 4].

The effect of changing the level of the sealing liquid. The sealing liquid level may vary under the influence of external factors such as temperature changes, liquid evaporation, or uneven immersion of the bell. A change in liquid level directly affects the displaced gas volume and can lead to an error in the measurement of the gas volume of up to 0,7% [2]. To solve this problem, an error correction model was developed in [2] that takes into account the change in the liquid level during the operation of the installation. The main idea is to dynamically balance the level of the sealing liquid and use compensation mechanisms to maintain a stable level.

The effect of gas temperature. When the temperature rises, the gas expands, which can introduce additional errors in the measured volume. When the temperature falls, the density of the sealing liquid changes, which affects the bell's immersion level. Temperature control is therefore a mandatory measure to minimize errors in bell-prover installations [1]. Even small temperature gradients in the air space around the bell can affect the stability of volume reproduction [7]; consequently, multi-point temperature sensing combined with compensation algorithms is recommended.

Thus, experimental results confirm that the implementation of automated, digital control systems is a key direction for improving the accuracy of bell-prover flow-measurement installations.

III. Conclusions

Based on the analysis of scientific sources, the review of technical characteristics of reference bell-provers, and known research results, the following conclusions were made:

- the metrological performance of bell-prover installations significantly depends on a number of factors, in particular the operating pressure, the level of the sealing liquid, and the ambient temperature; the influence of these factors can lead to significant systematic measurement errors that are unacceptable for reference standards;
- automation of the processes for reproducing gas volume and for calibrating meters (flow meters) plays a key role in reducing errors and increasing the efficiency of a bell-prover; implementation of adaptive control algorithms can substantially decrease the prover's measurement error and shorten the duration of devices calibration.

As a result of the analysis of the bell-prover installation available at Lviv Polytechnic National University as the control object, it is proposed to upgrade the subsystems for stabilization of air pressure beneath the bell, regulation of the sealing liquid level to compensate dynamic level changes and stabilization of air temperature during meter verification. Such improvements will increase the accuracy of the installation, reduce the subjective influence of the operator, and enable integration with data acquisition and analysis systems.

References

[1] Brodyn I. S. Accurate accounting of natural gas flow rate is the key to reducing its losses // Methods and devices for quality control, No. 7, 2001. – P. 116–118.

[2] Melnychuk S. I. Research on the influence of changes in the level of the locking liquid in bell-type installations on the accuracy of gas volume reproduction // Methods and devices for quality control, No. 9, 2002. – P. 45–49.

[3] Petryshyn I. S., Prysyazhnyuk T. I., Bas O. A. Estimation of the uncertainty of a bell-type calibration installation for operation at high pressure // Information Processing Systems, 2015, vol. 2 (127). – P. 39–42.

[4] Seredyuk O. E. Mathematical modeling of the error caused by pressure instability in bell-type flow-measuring installations // Methods and devices for quality control. – 1998. – No. 2. – P. 23–27.

[5] Pavlović B. Advances in gas flow measurement using weighing method // Strojarstvo. – 2008. – Vol. 50, No. 5. – P. 295–304.

[6] Pavlović B., Kozmar H., Šunić M. A new system for the calibration of gas flow meters // Transactions of FAMENA. – 2009. – Vol. 33, No. 1. – P. 37–46.

[7] Wegelin V. Calibration and Maintenance // Instrument and Automation Engineers' Handbook: Process Measurement and Analysis / eds. Lipták B. G., Venczel K. – 5th ed. – Vol. 1. – Boca Raton (FL): CRC Press, 2017. – P. 246–259.

[8] National Metrological Institute of Netherlands. – URL: https://nmi.nl

[9] National Physical Laboratory (NPL), United Kingdom. – URL: https://www.npl.co.uk/calibration

[10] Mickan B., Kramer R. Evaluation of two new volumetric primary standards for gas volume established by PTB // In: Proc. of the 7th International Symposium on Fluid Flow Measurement (ISFFM). – 2009. – Anchorage, Alaska.

[11] Seredyuk D. O. Bell device for calibration and verification of flow meters and gas meters: patent for utility model No. 27563, Ukraine. – 2007.

[12] YongWan, PengTian. Design and Implementation of Automatic Switching Exhaust Method and Air Intake Method Bell Prover Gas Calibration Facility // J. Phys.: Conf. Ser. – 2023. – Vol. 2459. – Article 012110. – DOI: 10.1088/1742-6596/2459/1/012110

MCIT Modeling, control & information technologies

Rationale for selecting the type of grinding balls in energy-efficient invariant control of ore comminution

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.112

Mykola Khliebnikov
Department of automation of production processes
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
khlebnikov97@gmail.com

Anatolii Matsui
Department of automation of production processes
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
matsuyan@ukr.net

Yaroslav Les
Department of automation of production processes
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
yarik0690@gmail.com

Abstract — **This publication is devoted to the rationale of the choice of high-hardness grinding balls and the implementation of energy-efficient invariant control measures for ore comminution processes in the first-stage ball mills, ensuring reduced energy consumption and increased mill productivity.**

Keywords — ball mill; ore comminution; 6th hardness group

I. INTRODUCTION

Ukraine is one of the world's leading producers of iron ore raw materials: in 2023 it ranked sixth globally in terms of production volume [1]. The depletion of rich ore reserves since the second half of the 20th century has led to an increased role of beneficiation of low-grade ores, where material sized 0–25 mm is ground to liberate valuable mineral inclusions.

One of the ways to optimize this process is the development of staged crushing and the use of steel grinding balls and liners. This is important because comminution processes consume 7–10% of global energy and about 2% of the world's metal production, with a specific energy consumption of 20–60 kWh/t [2]. At mining and beneficiation plants, energy consumption for grinding reaches up to 20% of the global level.

Ball mills remain the main equipment used for grinding – they are productive, reliable, and simple to operate. However, their main disadvantage is the high specific energy consumption and the low efficiency of surface formation [2]. As a result, total capital and operating costs in beneficiation plants reach 50–70%. This issue remains relevant today, especially for the first grinding stage, which consumes the most energy resources.

II. TYPES AND COMPOSITION OF GRINDING BALLS

Analysis has shown that in the first stages of grinding at modern beneficiation plants, it is advisable to use balls with a diameter of 80 mm or smaller. This ensures finer grinding (better mineral liberation), increases the content of the valuable component in the product, and prevents excessive power consumption in mills with a diameter exceeding 3.6 m. Another advantage of smaller balls is the reduced wear of the liner and the preservation of ball integrity.

Enhancing the durability of grinding balls remains a key issue worldwide. High-hardness balls are recommended since they increase process efficiency. Cast iron balls can be more effective under certain conditions compared to steel ones, but their use in the first stages of grinding is currently impractical, prompting the search for alternatives. One solution is chromium steel balls, whose loading and replenishment rates are twice as low as those of cast iron balls.

The wear rate of balls is directly proportional to the mill drum diameter – the larger it is, the faster the wear. Since harder grinding bodies abrade softer ones, balls within a charge must have uniform hardness. The use of 5th hardness group balls does not increase the wear of various types of armor plates or rubber liners. They also retain their spherical shape throughout the service period.

The quality of the produced balls must be controlled at the consumer's site, and they should be used in mills grinding ore of the same technological type. Currently, the most effective are the 6th hardness group steel balls produced in Ukraine by the company "Energosteel". These steel balls are optimal even under wet grinding conditions, where corrosion wear is significant. They

demonstrate equally high hardness from the surface to the core, which minimizes wear and reduces costs [3].

According to DSTU 8538:2015, grinding balls of the 5th and 6th hardness groups produced by Energosteel are made from high-carbon alloy steels with a high content of alloying elements [4]. The best results, however, can only be achieved when both balls and liners are of uniform hardness and quality is continuously monitored directly at the consumer's site.

Indirect benefits of using high-quality balls include increased mill productivity and reduced specific energy consumption. The use of high-hardness balls does not require additional operational or capital costs, while the cost of concentrate changes only due to ball consumption. As a result of using 6th hardness group balls, a reduction in specific consumption (compared to 5th group balls) of 10–30% was achieved, depending on the grinding conditions [5].

III. Quality control of grinding balls

An important component of improving production efficiency is the introduction of modern information and technical solutions for quality control of grinding media. Selective inspection is no longer sufficient – continuous control must be implemented, where all operations are automated with full documentation of results at both the manufacturer and the consumer. This approach is economically justified, as it ensures consistent product quality, reduces production costs in ferrous metallurgy, and enables higher-grade output.

Energosteel continuously improves its laboratory base for ball quality control. Recent upgrades include the introduction of an automated hardness tester capable of storing all measurement results, calculating average values automatically, and generating detailed reports [6].

Additionally, a wire-cut electrical discharge machine was installed, significantly accelerating sample preparation for volumetric hardness testing. Previously, cutting a 120 mm ball on a surface grinding machine took about two days, whereas now the process takes only six hours. This allows for faster results and prompt detection of possible deviations.

Furthermore, surface hardness and general product quality are inspected every two hours during the rolling of each new batch. Such a system guarantees full compliance with established standards and consistent quality characteristics.

IV. Factors affecting ball mill operation

Grinding of a single technological ore type or a mixture thereof in a separate ball mill using high-hardness balls (5th and especially 6th groups) allows the technological unit to operate close to its optimal mode. At the same time, its performance is influenced by numerous factors considered in the system analysis of the grinding process as an object of energy-efficient invariant control using predictive parameter estimation.

According to the literature, in the first stage of grinding in a closed circuit with a hydrocyclone, the decisive parameters include the ratio of ball and ore sizes, their quantity, density, and hardness, as well as the drum diameter and its rotation speed. Optimal ball loading must be maintained constantly, which requires a clear methodology. Although size segregation of balls in the drum is often considered negative, it can also have positive effects: smaller balls work efficiently at the feed end, while larger ones operate effectively at the discharge end.

The analysis shows that mill operation deviates from optimal conditions under the influence of several factors, which can be divided into three groups:

- variable factors – caused by mill operation (ball segregation and wear, liner wear, changes in pulp density and ore particle size);
- constant or conditionally variable factors – such as rotation speed, material and manufacturing technology of balls and liners, ore type;
- controllable factors – such as ore feed rate and pulp dilution at the inlet.

The study of ball mill operation reveals the particular impact of ball segregation. During grinding, balls are distributed along the drum, forming zones of nearly constant size, especially near the liner. The use of uniform balls allows for direct evaluation of grinding energy efficiency. Smaller balls efficiently pass ore through the low-density pulp near the feed end, acting collectively to create significant impact forces. Larger balls, operating at the discharge end, effectively overcome dense pulp and fine particles, breaking them by impact, compression, and abrasion. At a solid content of about 80%, undesired ball "packing" may occur, although dense pulp generally promotes better ore breakage.

Modern research indicates that specially shaped grinding bodies increase the packing density and productivity of the mill. When using uniform balls, their volume fraction reaches 74% (compared to 26% of voids filled with ore), whereas with multi-sized loading, the voids reach 38%, reducing mill efficiency. Thus, segregation has both negative and potentially beneficial effects that can be accounted for in practice.

Operational data from beneficiation plants show that, in practice, ball replacement according to wear is rarely performed. The use of variable-speed drives is economically unjustified, as costs outweigh benefits. Productivity loss due to liner wear can be partially offset by additional ball feeding, but automatic grinding media control systems have yet to be implemented. Optimization requires accounting for changes in pulp density and viscosity along the drum, while simultaneous ore discharge from three bunkers onto one conveyor does not ensure proper size homogenization.

In closed circuits with hydrocyclones, the main disturbing factors are the particle sizes of the feed and sand, while the ore feed rate serves as a control variable. The classifier sand flow may act as either a regulated or disturbing parameter, depending on the control scheme. Process economy is achieved only under full grinding media loading, which can be monitored via indicators of grinding energy efficiency. Since a method has been developed for determining the weighted average particle size of single-spiral classifier sands, it is possible to implement the control characteristic of the closed grinding circuit proposed by O. M. Maryuta.

V. CONCLUSIONS AND PROSPECTS FOR FURTHER RESEARCH

Thus, the fundamental principles of first-stage ore grinding are well developed and widely applied. To raise the performance of ball mills to a new qualitative level, a set of measures must be implemented. These include the substantiation of new approaches, automated regulation of key parameters, and organizational as well as technical improvements. The most challenging tasks are those aimed at enhancing overall production culture – namely, the transition to specific types of balls and liners, adaptation of mills to particular ore types, and the implementation of advanced monitoring and control systems.

REFERENCES

[1] U.S. Geological Survey, "Iron ore statistics and information," National Minerals Information Center. [Online]. Available: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/iron-ore-statistics-and-information. Accessed: Sep. 29, 2025.

[2] Y. V. Naumenko, "*Fundamentals of the theory of operating modes of rotary mills"*, Rivne: SPD Zelept, 2009, pp.282

[3] Energosteel, "Meeting with a European partner within Energosteel company walls," [Online]. Available: https://energosteel.com/uk/zustrich-z-ievropejskim-partnerom-v-stinah-kompanii-energostil/. Accessed: Sep. 29, 2025.

[4] Energosteel, "How alloying elements affect the wear of grinding balls," [Online]. Available: https://energosteel.com/kak-vliyajut-legirujushhie-elementy-na-stepen-iznosa-meljushhih-sharov/. Accessed: Sep. 29, 2025.

[5] Energosteel, "How GZK choose steel grinding balls," [Online]. Available: https://energosteel.com/uk/gzk-vibirajut-stalevi-pomolni-kuli/. Accessed: Sep. 29, 2025.

[6] Energosteel, "New automated equipment in Energosteel laboratory," [Online]. Available: https://energosteel.com/uk/nove-avtomatizovane-obladnannya-v-laboratorii-energostil/. Accessed: Sep. 29, 2025.

Transient Frequency Spectrum Analysis for Single Line-to-Ground Fault Location in Insulated Power Systems

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.113

Oleksandr Shepel
Department of Production Process Automation
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
iam.alex.shepel@gmail.com

Anatolii Matsui
Department of Production Process Automation
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
matsuyan@ukr.net

Abstract—**This paper addresses the challenge of single line-to-ground fault location in insulated electrical systems. Traditional steady-state measurement methods are often inadequate for these systems due to the minimal fault current, which is difficult to measure accurately against background noise and makes the methods sensitive to high fault resistance. Transient frequency spectrum analysis is presented as a superior alternative, utilizing the high-frequency signals generated at the moment a fault occurs, which are largely independent of fault resistance. The zero-sequence voltage and current are used to provide the transient components for this analysis. However, commonly deployed digital fault recorders in Ukrainian substations are unsuitable for fault location through spectrum analysis due to their limited frequency bandwidth, absence of a fundamental frequency filter, and high cost. To overcome these limitations, a custom digital fault recorder prototype with a 64 kHz bandwidth and an analog input filter has been designed and developed.**

Keywords—fault location; insulated systems; Transient Frequency Spectrum Analysis (TFSA); Single Line-to-Ground (SLG) fault; Digital Fault Recorder (DFR); zero-sequence components; high-frequency transients.

I. Introduction

The necessity of transient frequency spectrum analysis (TFSA) for fault location in insulated systems stems from the fundamental inadequacy of traditional, steady-state measurement methods. There is why this theme is Insulated systems are specifically designed to restrict the single line-to-ground (SLG) fault current to a minimal, primarily capacitive, magnitude. As a result, standard fundamental frequency (50 Hz) impedance calculations are unreliable because measuring the zero-sequence current accurately against background noise is extremely challenging. Furthermore, traditional impedance methods are highly sensitive to high fault resistance, leading to substantial errors in distance estimation.

TFSA overcomes these limitations by utilizing the distinct, high-frequency signals generated at the moment the fault occurs. This approach isolates the nonstationary frequency components that propagate along the line according to the Distributed Parameter Line Model (DPLM), which maps the spectral content to the distance to the fault. Critically, by focusing on these short-duration, high-frequency wave characteristics rather than the problematic steady-state current, the resulting fault location accuracy becomes largely independent of the fault resistance. Techniques like the Fast Fourier Transform (FFT) are employed to extract these high-frequency components, providing a precise measurement that locates the fault. For these reasons, TFSA-based techniques are widely investigated and applied in numerous research studies [1], [2], [3].

II. Signals used in Transient Frequency Spectrum Analysis

For fault location in insulated systems using the TFSA, two signals are utilized in the frequency domain: the zero-sequence voltage (V0) and the zero-sequence current (I0). The use of these zero-sequence quantities is essential because an SLG fault is an inherently unbalanced condition that results exclusively in these components.

When an SLG fault occurs in an insulated system, the V0 at the bus rises substantially, and the I0 flows to the fault. While the steady-state I0 magnitude is very low and unreliable for measurement in insulated systems, the *transient* components of V0 and I0 generated immediately after the fault provide high-frequency wave characteristics that can be accurately mapped to the distance to the fault.

Modeling of the SLG fault using DPLM shows that the transient component has a frequency up to 50 kHz.

III. Commonly used Digital Fault Recorders

Two commonly used Digital Fault Recorders (DFRs) on Ukrainian substations are the "Altra" and the "Rekon" series, both of which are deployed across various device models. Unfortunately, these devices are unsuitable for use with the proposed TFSA-based fault location method, due to the following limitations:

1) *Limited frequency bandwidth*, up to 9-12 kHz;

2) Absence of a hardware fundamental frequency filter, which significantly limits the resolution of the digitalized high-frequency component having significantly lower amplitude than the fundamental frequency component;

3) High costs make their installation unreasonable for low-power 35/10 kV substations.

IV. Prototyping of Custom Digital Fault Recorder

Reasons described above make it mandatory to develop a custom DFR to be able to satisfy the operational requirements.

The fundamental frequency component of the zero-sequence signal significantly impacts the amplitude of the measured signal. Without an analog filter, this high-amplitude fundamental component consumes the majority of the available resolution of the Analog-to-Digital Converter (ADC). This process severely limits the effective resolution available for the critical high-frequency harmonics, effectively masking the transient data required for analysis. It is essential to have a filter of fundamental frequency in the analog input of the sensor.

The prototype's Bode plot for the analog input with applied fundamental frequency filter is shown in Fig. 1. It demonstrates a significant reduction of response for 0-100 Hz frequency bandwidth.

The entire prototype of DFR is shown on Fig. 2.

V. Conclusion

Traditional steady-state methods are fundamentally inadequate for SLG fault location in insulated power systems due to minimal fault current and high sensitivity to fault resistance.

TFSA overcomes these limitations by utilizing distinct, high-frequency transients of V0 and I0. This approach ensures that the fault location accuracy is largely independent of the fault resistance.

Existing DFRs in Ukrainian substations are unsuitable for TFSA because of their limited bandwidth (up to 12 kHz), high cost, and the lack of a necessary fundamental frequency filter.

To enable the practical deployment of TFSA, a custom DFR prototype with a 64 kHz bandwidth and a dedicated analog fundamental frequency filter was successfully designed and developed. This custom hardware resolves the measurement constraints, making the precise and reliable TFSA-based fault location method viable for insulated systems.

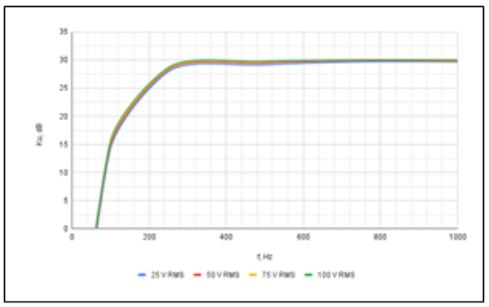


Figure 1. Bode plot of prototype's analog input

References

[1] T. Treider and H. K. Høidalen, "Estimating distance to transient and restriking earth faults in high-impedance grounded ring-operated distribution networks using current ratios," Electric Power Syst. Res., vol. 224, Art. no. 109765, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109765.

[2] R. Benato, G. Rinzo, and M. Poli, "Overcoming the Limits of the Charge Transient Fault Location Algorithm by the Artificial Neural Network," Energies, vol. 12, no. 4, Art. no. 722, 2019, doi: 10.3390/en12040722.

[3] M. Akdağ, M. S. Mamiş, and D. Akmaz, "Enhancing Fault Location Accuracy in Transmission Lines Using Transient Frequency Spectrum Analysis: An Investigation into Key Factors and Improvement Strategies," Electricity, vol. 5, no. 4, Art. no. 43, 2024, doi: 10.3390/electricity5040043.

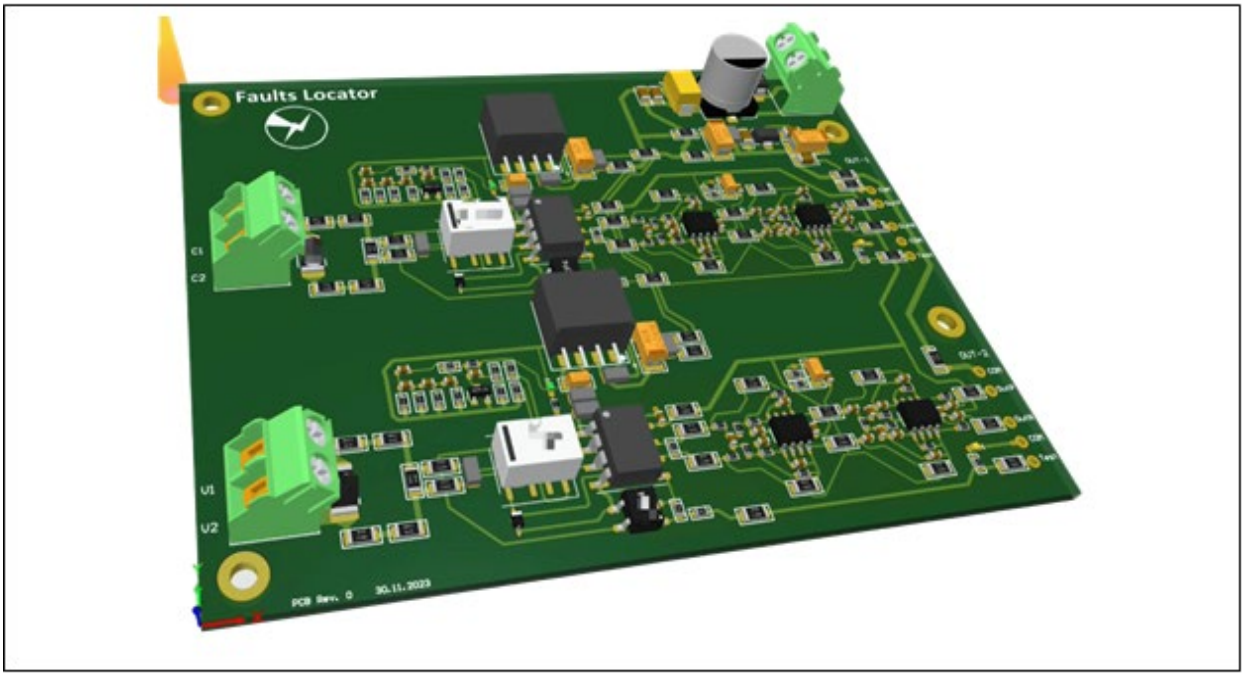


Figure 2. Prototype of DFR for SLG fault location

MCIT Modeling, control & information technologies

Analysis Of Oxygen Sensor Dynamics For Catalytic Converter Diagnostics Using On-Board Logging Data

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.114

Serhii Klimov
National University of Water and Environmental Engineering,
Institute of Energy, Automation, and Water Management
Rivne, Ukraine
s.v.klimov@nuwm.edu.ua

Igor Khitrov
National University of Water and Environmental Engineering, Mechanical Institute
Rivne, Ukraine
i.o.khitrov@nuwm.edu.ua

Abstract — **A catalytic converter is an important component of modern internal combustion engines, used to reduce the toxicity of exhaust gases by neutralizing harmful components such as nitrogen oxides, carbon monoxide, and unburned hydrocarbons. Successful operation of the converter requires maintaining a stoichiometric ratio of fuel to oxygen, which for gasoline engines is 14.7:1. This ratio is controlled by an automatic control system, the key element of which is an oxygen sensor (lambda probe). This paper aims to experimentally study the efficiency of a three-way catalytic converters (TWC) by analyzing the dynamics of oxygen sensor signals obtained using an on-board diagnostic system (OBD). The diagnostic method is based on comparing ECU signals from sensors before (Sensor 1) and after (Sensor 2) the catalytic converter. Real data from OBD parameter logging (Engine Load, RPM, O2 Sensor Voltages) during movement was used for analysis. Data analysis showed that under conditions of dynamic movement and load changes (Engine Load), the control sensor signal (Sensor 1) fluctuated constantly (0.1–0.9 V), while the diagnostic sensor signal (Sensor 2) remained consistently high (0.6–0.7 V). This behavior confirms that the TWC successfully accumulates oxygen and equalizes the composition of exhaust gases, which indicates its high efficiency and the absence of fault code P0420.**

Keywords — Oxygen Sensor; Catalytic Converter; On-Board Diagnostics (OBD)

I. INTRODUCTION

A. Justification of Research Relevance

To reduce the toxicity of exhaust gases through the reduction of nitrogen oxides and the use of oxygen to burn carbon monoxide and unburned hydrocarbons, a catalytic converter is used in modern internal combustion engines. It is installed in the exhaust system of the engine and the main requirement for its successful operation is to ensure the stoichiometric ratio of fuel and oxygen in the fuel-air mixture, [1].

B. Problem Statement

In contemporary engines, the maintenance of the air-fuel ratio close to the optimal is carried out by means of an automatic control system. The core challenge lies in continuously monitoring and ensuring the proper functioning of the catalytic converter to guarantee compliance with emission standards, especially since its operation is critically dependent on a precisely controlled air-fuel mixture, [2].

C. Review of the Current State of Research

The stoichiometric mixture is a composition, which ensures complete combustion of fuel without residual oxygen, and the coefficient of excess air for this combustible mixture is equal to one. For gasoline internal combustion engines with spark ignition, the stoichiometric ratio is air/fuel, equal to 14.7:1 (mass parts). The main sensor in such systems is a sensor of the concentration of free oxygen in the exhaust gases of the engine — the oxygen sensor (or lambda sensor). Three-way catalytic converters (TWC) to neutralize carbon monoxide (CO), hydrocarbons (CxHy) and nitrous oxide (NO and NO2) use two different types of catalysts: reducing and oxidizing, [3]. Both types are made in the form of a ceramic structure (carrier block) coated with a metal catalyst (usually platinum or its alloy). Unburned residues are oxidized by oxygen released during the NO reduction reaction and also partially contained in the exhaust gases, which releases heat and activates the catalyst, [4].

Today, approaches based on artificial intelligence are increasingly being sought for adaptive emission control and sensor diagnostics [5]. It is also important for Ukraine to reduce emissions from high-mileage vehicle fleets by replacing catalytic converters and oxygen sensors [6]. Therefore, research aimed at creating a program for vehicle inspection and maintenance using OBD is important [7].

II. METHODS

A. Collection of experimental data

To empirically verify the effectiveness of TWC diagnostics, data obtained using an on-board diagnostic system (OBD II) for a 63 kW 86 hp BXW VW CGGB 1.4 MPi 16v engine during a real driving cycle was used. Parameters were logged with time and geolocation recording. The key parameters selected for analysis were: Engine Load (%), Engine RPM (rpm), Speed (OBD) (km/h), Engine Coolant Temperature (°C), O_2 Bank 1 Sensor 1 Voltage (V), and O_2 Bank 1 Sensor 2 Voltage (V). Throttle Position (Manifold) (%), Speed (GPS)(km/h) and Speed (OBD)(km/h) were also taken into account. The data was obtained in csv format.

B. Methodology for analyzing sensor signals

The technical condition of the TWC was analyzed by evaluating the dynamic behavior of oxygen sensor signals. When the catalytic converter is working effectively, the control sensor (O_2 Bank 1 Sensor 1, upstream of the catalytic converter – TWC) should show rapid voltage fluctuations (between 0.1 V and 0.9 V), while the diagnostic sensor (O_2 Bank 1 Sensor 2, downstream of the catalytic converter) should have a stable, slowly changing voltage (preferably 0.6 V... 0.7 V). Any increase in the switching frequency of Sensor 2 would indicate a decrease in the ability of the catalytic converter to accumulate oxygen. The analysis was carried out both when the engine reached operating temperature (above 80 °C) to ensure the correct operation of the sensors, and during the engine warm-up phase and the gradual transition of the sensors to steady-state operation.

III. RESULTS:

Analysis of the oxygen sensors (O_2 S1 and O_2 S2) over time is crucial for evaluating the efficiency of the catalytic converter. O_2 Bank 1 Sensor 1: Rapid and regular voltage fluctuations (from ≈0.1 V to ≈0.9 V) are observed. This is normal behavior for a narrowband sensor, which actively helps the ECU maintain a stoichiometric ratio (λ≈1) by constantly correcting the fuel mixture. O_2 Bank 1 Sensor 2: The voltage is stable, mostly staying in the range of ≈0.6 V...0.7 V, and has very slow and low-amplitude changes. This indicates that the catalytic converter is successfully accumulating oxygen and equalizing the composition of the exhaust gases, [8].

There is no direct dependence on load (Engine Load) and speed (RPM) for O_2 Bank 1 Sensor 1; a constant switching cycle is maintained for mixture correction.

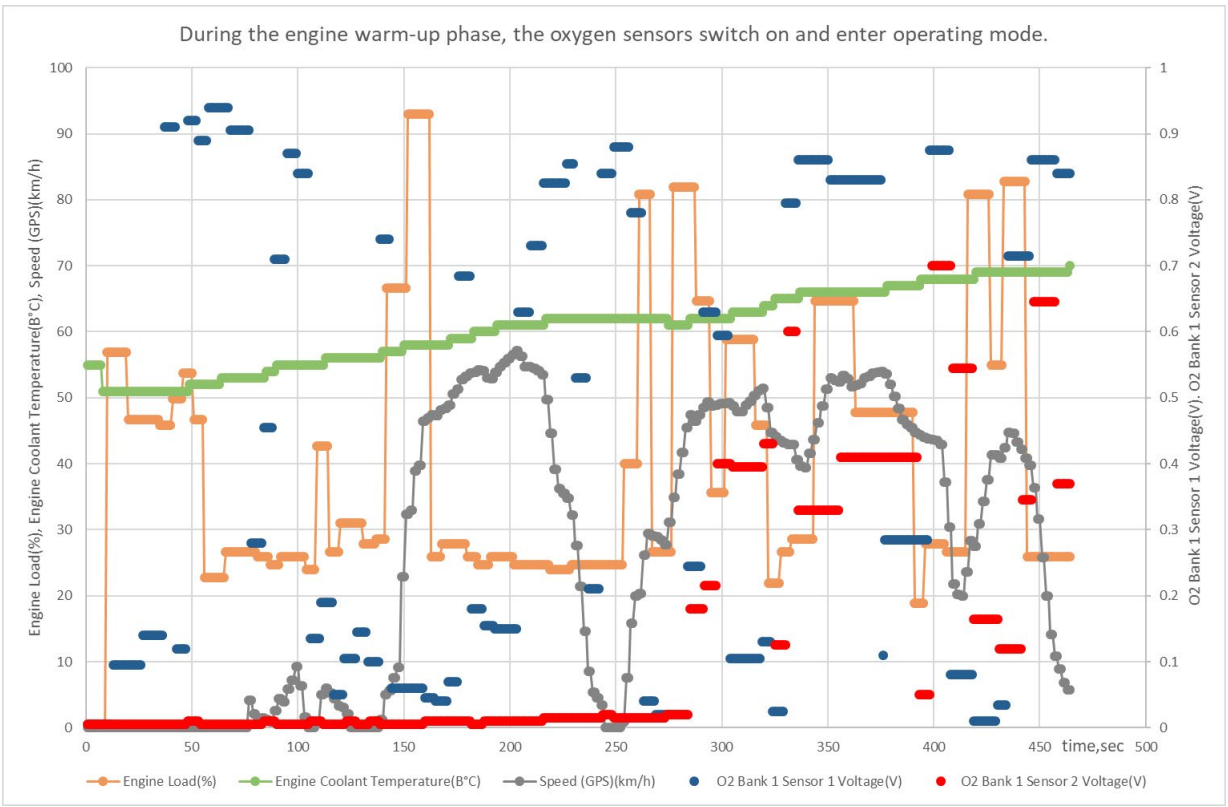


Fig. 1. graphs of oxygen sensors operation during engine warm-up.

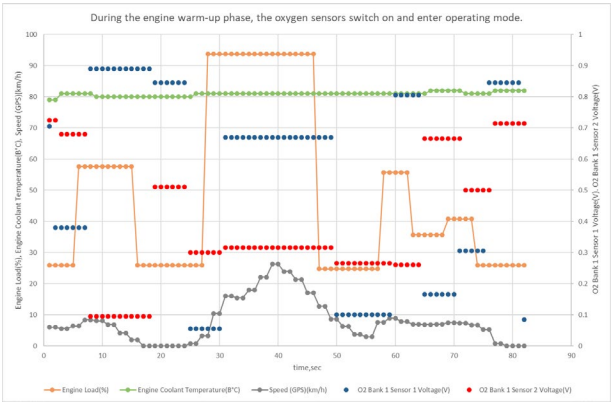


Fig. 2. Engine operation in “city” mode, frequent sudden load changes during acceleration, low speeds, reduction of voltages S1 and S2 (from 0.9 and 0.7 to 0.67 and 0.32 V, respectively) with an increase in Engine Load (up to 95%)

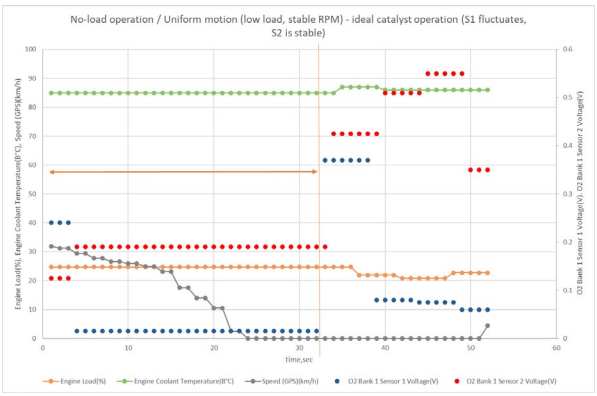


Fig. 3. Engine operation during smooth deceleration, idle speed, consistently low voltage S1 and S2 (up to 0.25 V)

IV. Conclusions

The analysis of real log data confirmed the theoretical basis for KN diagnostics. The dynamics of oxygen sensors (Fig. 2, 3) clearly showed that Sensor 1 constantly corrected the mixture, while Sensor 2 remained stable, which is direct evidence of the high current efficiency of the catalytic converter.

In addition, it was found that the stability of the Sensor 2 signal is maintained across the entire range of engine load and speed, confirming the reliability of the catalytic converter in dynamic driving conditions (Fig. 2).

The results obtained demonstrate that on-board logging is an effective tool for continuous monitoring and assessment of the technical condition of the catalytic converter before critical fault codes such as P0420/P0430 appear.

References

[1] J. G. Speight, ‘Chapter 10 - Combustion of Hydrocarbons’, in Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes, J. G. Speight, Ed., Boston: Gulf Professional Publishing, 2011, pp. 355–393. doi: 10.1016/B978-0-7506-8632-7.10010-6.

[2] Ł. Warguła, B. Wieczorek, L. Gierz, and B. Karwat, ‘Critical Concerns Regarding the Transition from E5 to E10 Gasoline in the European Union, Particularly in Poland in 2024—A Theoretical and Experimental Analysis of the Problem of Controlling the Air–Fuel Mixture Composition (AFR) and the λ Coefficient’, Energies, vol. 18, p. 852, Feb. 2025, doi: 10.3390/en18040852.

[3] ‘Emission control technologies - ULEV - EC Public Wiki’. Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: https://wikis.ec.europa.eu/spaces/ULEV/pages/44142147/Emission+control+technologies

[4] Y. Huang et al., ‘Effective emissions reduction of high-mileage fleets through a catalytic converter and oxygen sensor replacement program’, Sci. Total Environ., vol. 850, p. 158004, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158004.

[5] L. Heroual, M. L. Berkane, N. El, and N. E. H. Bouzerzour, Towards an AI-Based Approach for Adaptive Emission Control and Sensor Diagnostics: A gasoline engine case study. 2023.

[6] Y. Huang et al., ‘Effective emissions reduction of high-mileage fleets through a catalytic converter and oxygen sensor replacement program’, Sci. Total Environ., vol. 850, p. 158004, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158004.

[7] C. Zhong, S. Shen, J. Li, and Z. Yang, ‘The research of the inspection and maintenance program and its implementation’, E3S Web Conf., vol. 360, p. 01014, Nov. 2022, doi: 10.1051/e3sconf/202236001014.

[8] M. Gubach, S. Klimov, and A. Litvinchuk, ‘Oxygen sensors in determining the technical condition of the catalytic converter using on-board diagnostics systems’, in *Book of Papers*, Zhytomyr: ZSTU, 2021, pp. 216–217. Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: https://conf.ztu.edu.ua/current-trends-in-young-scientists-research-april-22-2021/

MCIT Modeling, control & information technologies

Remote Control System for a VTOL UAV Stand with Computer Vision Elements

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.115

Oleh Tsukanov
National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine
tsukanov_ak23@nuwm.edu.ua

Dmytro Reut
National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine
d.t.reut@nuwm.edu.ua

Abstract — **This work presents a remote control system for a vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle (VTOL UAV) stand, implemented using the ESP32 microcontroller. The system provides control of actuators and aviation lights through a local web interface via a Wi-Fi connection. Additionally, a visualization subsystem was developed, including a camera with remote positioning capabilities and a human silhouette recognition algorithm using computer vision tools. The processed video stream is displayed on the web interface, with detected objects automatically highlighted by graphical bounding boxes. The proposed solution integrates hardware and software components, offering intuitive control and basic computer vision functions to enhance system functionality.**

Keywords — **UAV; remote control system; computer vision; web interface.**

INTRODUCTION

Modern unmanned aerial vehicles (UAVs) are increasingly used in various fields. This creates a need for solutions that allow the study of control algorithms, data processing, and integration with user interfaces.

Today, special attention is given to computer vision systems for real-time object detection and tracking. Combining a camera with remote positioning capabilities and human silhouette recognition enables enhanced monitoring, particularly through web interfaces.

PROBLEM SOLUTION

This work presents the development of a UAV stand based on the ESP32 microcontroller and an ARM Linux computer, which performs human silhouette detection on video frames and streams the results to the user in an intuitive and convenient format.

The stand [1] was additionally equipped with a microprocessor board based on the ESP32 microcontroller, which implements a local HTTP server. The user connects to the local server via a Wi-Fi access point created by the built-in Wi-Fi module of the ESP32. After connecting to the Wi-Fi access point, the user can either open a webpage in a browser using the IP address of the Wi-Fi module or scan a QR code to access the local HTTP server link. This opens a graphical web interface, from which the user can control the stand. To simplify user access to the UAV control system, a Captive Portal mechanism was implemented. After connecting to the Wi-Fi access point created by the ESP32, the user is automatically redirected to the local web interface without the need to manually enter the IP address. This approach improves usability, as the operator gains immediate access to the control interface.

The web interface was implemented as a web page using HTML and CSS. Within this interface, the user can control the ailerons through an interactive joystick (Fig. 1), which simulates the operation of an aircraft control yoke. Additionally, the interface includes buttons for switching the aircraft navigation lights on and off, buttons for activating or deactivating the vertical take-off motors, a reset button that returns all elements to their default position, and a slider for adjusting both the speed and direction of the thrust motor. The interface also provides dedicated controls for camera positioning, enabling the user to rotate the onboard camera via servo drives in both horizontal and vertical directions.

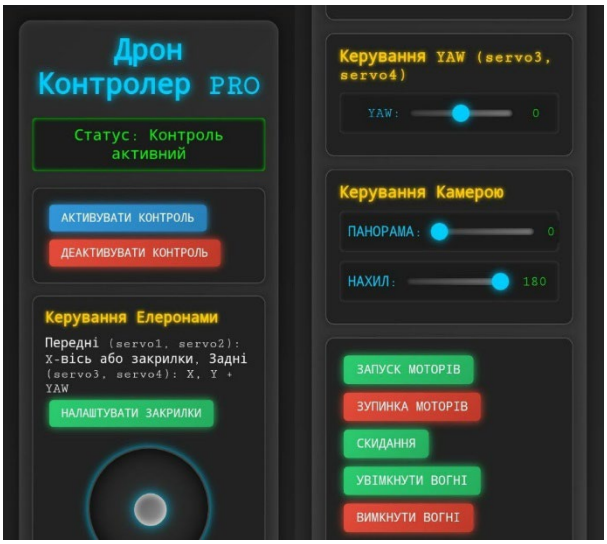


Fig. 1. User interface

Furthermore, the system was extended with an ARM-based Linux computer (Rockchip RK3188, 2 GB RAM) responsible for real-time video processing. A Python script, executed as a daemon, performs two primary tasks: (1) capturing and processing images from a USB camera, and (2) streaming the processed video over a local Flask-based HTTP server.[2] For image analysis, the system employs the OpenCV library with a

Histogram of Oriented Gradients (HOG) descriptor for pedestrian detection. [3]

Video Processing Workflow:

- The video stream from the onboard camera is processed on an ARM-based embedded Linux computer. The image-processing script is implemented in Python using the OpenCV library. The workflow consists of the following steps:
- Capturing frames from the USB camera.
- Downscaling the frames to optimize processing speed.
- Applying the HOG (Histogram of Oriented Gradients) descriptor for human detection [1].
- Drawing bounding boxes around detected objects.
- Encoding the processed frames into an MJPEG stream for transmission to the web interface.

As a result, the operator receives both control functionality and real-time visual feedback within a single interface. The script is executed in daemon mode to ensure continuous operation, while a Flask-based server streams the video via the /video_feed route.

In addition, servo-based camera positioning is integrated, enabling dynamic adjustment of the field of view and object tracking.

Figure 2 presents the structural diagram of the remote control system for the VTOL UAV stand, implemented on a controller based on the ESP32 microcontroller. The red, green, and white LEDs, serving as aviation navigation lights, are switched on through transistors upon command from the microcontroller.

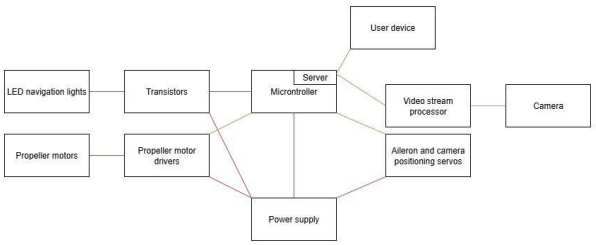


Fig. 2 Structural diagram

The current through the LEDs is limited by series-connected resistors. The vertical lift propeller drives are controlled via L298N motor driver ICs. PWM control signals for the servos of the ailerons and flap-ailerons are provided directly from the ESP32 microcontroller board. A camera mounted on a servo gimbal is also controlled by the ESP32, allowing remote positioning to adjust the viewing angle.

For the UAV stand (fig. 3), actuators were selected based on load:

- SG90 micro servo – camera gimbal. Torque ~1.8 kg·cm, speed 0.12 s/60°, supply voltage 4.8–6 V, weight 9 g.
- MG996R servo – wing ailerons. Torque 9.4 kg·cm, speed 0.14 s/60°, supply voltage 4.8–7.2 V, weight 55 g.
- MG90S servo – tail ailerons. Torque 2.2 kg·cm, speed 0.11 s/60°, supply voltage 4.8–6 V, weight 13 g.
- L298N motor driver controls propulsion motors, supply voltage 5–35 V, current 2 A/channel, PWM.



Fig. 3. VTOL UAV stand

CONCLUSION

The developed remote control system for the VTOL UAV stand, based on an ESP32 server using a local Wi-Fi network and a web interface, demonstrates stable operation provided the user remains within sufficient Wi-Fi signal range (near the UAV). The system is intuitive and easy to operate. Integration of motor drivers ensures smooth speed regulation of the propellers.

Additionally, the video stream from the UAV's onboard camera is transmitted via a ARM-based embedded Linux device connected to the system. The video feed is processed and displayed in real time within the same web interface used for control, providing the operator with both telemetry and visual feedback in a single environment.

REFERENCES

[1] Tsukanov O.S., Reut D.T. СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ ДРОНОМ ЧЕРЕЗ ВЕБ-СЕРВЕР НА ESP32 [Remote Drone Control System via ESP32 Web Server]. Zbirnyk tez dopovidei Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity ta molodykh vchenykh "VODA. ZEMLYA. ENERGETYKA", Rivne, 15 May 2025. Rivne: NUWEE, 2025. [in Ukrainian]

[2] Pallets, "Flask," GitHub repository, https://github.com/pallets/flask

[3] OpenCV, "HOG Descriptor and Object Detection," Documentation, [Online]. Available: https://docs.opencv.org/4.x/d5/d33/structcv_1_1HOGDescriptor.html

MCIT Modeling, control & information technologies

Analysis of parametric and time-angle methods for determining the distance and positioning of unmanned aerial vehicles

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.116

Volodymyr Yarmolenko
Department of Automation of Production Processes
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
yarmolenkoc262@outlook.com

Oleksandr Serbul
Department of Automation of Production Processes
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
serbulan@ukr.net

Oles Izovita
Department of Automation of Production Processes
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
oles1103@gmail.com

Abstract—**The paper considers modern approaches to determining the distance and positioning of unmanned aerial vehicles (UAVs) using radio signal parameters—RSSI, SNR, LQ—as well as ToF, TDoA, and AoA methods. The relevance of the research in the context of digital transformation and limitations of satellite technologies (GPS/GNSS) is justified. The accuracy, advantages, and disadvantages of each method are analyzed, and an integrated formula for distance estimation based on a combination of RSSI+SNR+LQ is presented. It is shown that the combination of parametric and time-angle methods increases the reliability and accuracy of UAV navigation. The prospects for the development of hybrid positioning systems using self-calibration algorithms, Kalman filters, and integration with 5G/6G and IoT technologies are noted.**

Keywords—UAV positioning; RSSI; SNR; ToF; TDoA; AoA; hybrid navigation systems.

I. Introduction

Digital transformation and the transition to Industry 4.0 necessitate the automation of technological processes with high precision, speed, and cost-effectiveness. One promising area is the use of unmanned aerial vehicles (UAVs), which, in combination with intelligent data processing systems, can optimize work processes, reduce costs, and increase the level of automation. Today, UAVs are widely used in agriculture, environmental monitoring, security, and defense, where their effectiveness largely depends on navigation accuracy.

Traditional satellite technologies (GPS/GNSS) have limitations due to interference and multipath effects, which makes the search for alternative and combined positioning methods relevant. The development of such solutions is aimed at increasing the autonomy and safety of UAVs, as well as contributing to the development of modern automation, telecommunications, and robotics technologies.

II. Formulation of Research Objectives

The aim of the work is to systematize approaches to positioning unmanned aerial vehicles using signals and technologies (RSSI, SNR, LQ, ToF, TDoA, AoA) with subsequent assessment of their suitability for improving the accuracy and reliability of navigation under restrictive conditions.

III. Statement of the Main Material

Measuring and determining the position of a UAV

The key accuracy parameters are positioning error, coordinate update frequency, and response speed. GPS provides an average accuracy of 5–10 m, DGPS — up to 1 m. INS (inertial systems) allow continuous tracking of movement, but accumulate error, so they are combined with GPS. The use of complementary filters (e.g., Kalman) allows data from different sources to be integrated and the shortcomings of each to be compensated for. In military and critical applications, an error of even a few meters may be unacceptable [1].

The importance of positioning accuracy

In civil applications: mapping, cargo delivery, and agricultural monitoring often require centimeter-level accuracy. In military applications: reconnaissance, targeting, attack, the margin of error must be minimal (up to tens of centimeters). From a flight safety perspective, accurate positioning allows obstacles to be avoided in real time (processing delay <100 ms) [2].

Modern methods of UAV positioning:

1. GPS/GNSS – the main method, sensitive to multipath, interference, and spoofing.

2. INS – an autonomous method that quickly accumulates errors.

3. Methods based on signal parameters:

- RSSI (signal strength),
- SNR (signal-to-noise ratio),
- LQ (channel quality).

These parameters allow you to estimate the distance to the signal source, but do not provide absolute coordinates on their own [3, 4].

4. ToF (Time of Flight) – measurement of signal transit time [5, 6].

5. TDoA (Time Difference of Arrival) – determination of the time difference between signals arriving from multiple sources [7, 8, 9].

6. AoA (Angle of Arrival) – estimation of the signal arrival angle to determine direction [1, 4].

Research on combining RSSI + SNR + LQ methods

- RSSI: reflects the level of the received signal (from –100 to 0 dBm). It is used to estimate distance, but depends on interference and the environment.
- SNR: a key indicator of signal quality; high (>20 dB) means a stable communication channel.
- LQ: reflects the integrity and reliability of the channel, measured as a percentage.

The integrated formula for determining distance takes all three parameters into account, which increases the reliability of calculations:

$$d_{final} = \left(10 \cdot \frac{A - RSSI}{10n}\right) \cdot \left(\frac{SNR}{SNR + k}\right) \cdot \left(\frac{LQ}{100}\right), \quad (1)$$

where A – is the reference RSSI at 1 meter; n – is the loss coefficient (n = 2 for open space, n = 3-4 for space with walls); k – is the adjustment coefficient (10–20 dB, selected experimentally).

It should be noted that in this case, the disadvantage is the need to calibrate the parameters (A, n, k) for each environment. However, the advantage is the possibility of using standard UAV telemetry channels [3].

ToF, TDoA, and AoA methods

ToF (time of flight). This method has the following characteristics:

- direct measurement of the time from signal transmission to reception;
- provides high accuracy (up to centimeters);
- vulnerable to multipath and noise [5, 6].

Examples of implementations are SS-TWR (single-shot two-way range) and DS-TWR (double two-way range with four messages)].

TDoA (time difference of arrival). This method has the following characteristics:

- requires at least three synchronized base stations;
- allows coordinates to be determined without the need for a return channel.

Used in UWB and LTE/5G systems [7, 8, 9].

AoA (angle of arrival). This method has the following characteristics:

- it is based on the use of antenna arrays to determine the direction of the signal source;
- it works well in combination with other methods (e.g., ToF + AoA).

The disadvantages of this method are its complexity and sensitivity to multipath [1, 4].

IV. Conclusions and Prospects for Further Research

No positioning method is universal. GPS/GNSS remains the basic solution, but alternatives are needed in conditions of interference or inaccessibility. The integration of RSSI+SNR+LQ with ToF, TDoA, and AoA methods significantly improves positioning accuracy and reliability. The use of combined approaches (hybrid systems) is a promising direction for the development of navigation for UAVs.

Further research should focus on creating self-calibration algorithms, applying filters (Kalman, particle), and integrating with 5G/6G and IoT technologies.

References

[1] Reza Zekavat, R., “Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances,” Michael Buehrer; Wiley, 2019. (references)

[2] Yunhao Liu, Zheng Yang, “Location, Localization, and Localizability: Location-awareness Technology for Wireless Networks,” Springer, 2024.

[3] Xu, J. , Liu, W. , Lang, F. , Zhang, Y. and Wang, C. (2010) Distance Measurement Model Based on RSSI in WSN. Wireless Sensor Network, 2, 606-611..

[4] Slavisa Tomic, Marko Beko, Rui Dinis, Luís Bernardo, “On Target Localization Using Combined RSS and AoA,” Sensors (Basel). 2018 Apr 19;18(4):1266.

[5] Steven Lanzisera1 , David T. Lin1 , Kristofer S. J. Pister, “RF Time of Flight Ranging for Wireless Sensor Network Localization,” Fourth Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES'06), Austria, June 30th, 2006.

[6] Lanzisera S., Lin D.T., Pister K.S.J., “Radio Frequency Time-of-Flight Distance Measurement for Low-Cost Wireless Sensor Localization,” IEEE Sensors Journal 11(3), pp. 837 - 845, Aprel 2011.

[7] Cole Dickerson, Saad Masrur, Jonah Dickerson, Özgür Özdemir, Ismail Güvenç, “Impact of Altitude, Bandwidth, and NLOS Bias on TDOA-Based 3D UAV Localization: Experimental Results and CRLB Analysis,” IEEE ICC 2025 Workshop on Positioning and Sensing over Wireless Networks, 2025.

[8] Chen J., Li Y., Yang X., Li Q., Liu F., Wang W., Li C., Duan C., “A Two-Stage Aerial Target Localization Method Using TDoA Measurements with the Minimum Number of Radars,” Remote Sens. 2023.

[9] Lee, S.C., Lee, W.R., You, K.H., “TDoA Based UAV Localization Using Dual-EKF Algorithm,” Control and Automation. CA, pp. 47 – 54, 2009.

MCIT Modeling, control & information technologies

Експериментальне дослідження впливу розташування вантажу на енергоефективність квадрокоптера

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.117

Віталій Вискорко
Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
vyskorko_vg24@nuwm.edu.ua

Андрій Христюк
Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
a.o.khrystyuk@nuwm.edu.ua

Олексій Литвиненко
Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
lytvynenko_ak20@nuwm.edu.ua

Анотація—**Мета цієї роботи — оцінити вплив зміщення корисного вантажу відносно центра мас на енергоефективність квадрокоптера. Досліди виконано на апараті з двигунами Gravity X 2812 (900 Kv), контролером SpeedyBee F405, ESC 40 A BLHeli_32, пропелерами 8040 та акумулятором 6S2P літій-іон 7800 мА·год (вага 900 г). Корисне навантаження становило 1,0 кг; маса апарата без батареї — 850 г; орієнтовна злітна маса — 2,75 кг. Було порівняно три положення вантажу: у центрі мас, зміщення на +5 см уперед і на −5 см назад; додатково вивчено бокове зміщення ±5 см. Виміряно середній та піковий струм, температуру ESC, тривалість польоту, показники стабілізації з логів Betaflight Blackbox. Результати показують, що відхилення центра мас на 5 см призводить до збільшення середнього споживаного струму на 10–22 % і скорочення тривалості польоту на 10–18 %. Отримані висновки узгоджуються з відомими підходами до моделювання й керування БПЛА [1], [2], а також із сучасними методами траєкторного планування, що враховують аеродинамічний опір та кінематичні обмеження [3]–[5].**

Ключові слова—квадрокоптер; енергоефективність; центр мас; корисне навантаження; літій-іонна батарея; Betaflight; Blackbox

I. АКТУАЛЬНІСТЬ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Енергоефективність багатороторних БПЛА є ключовою характеристикою, що визначає тривалість польоту, вантажопідйомність, діапазон застосувань та економічну доцільність місій. За однакових акумуляторів і силових компонентів різниця у розташуванні вантажу може суттєво змінювати витрати енергії через появу додаткових моментів і необхідність їх компенсації двигунами. Незбалансування центра мас (ЦМ) змушує контролер підвищувати команду тяги на окремих моторах, що веде до зростання середнього струму, нагріву ESC і акумулятора, а також прискореного зносу підшипників. Теоретично питання впливу масорозподілу описується у підручниках та оглядових роботах із проєктування БПЛА [1], але практичні оцінки для конкретних конфігурацій і режимів потребують експериментальної перевірки.

Крім того, сучасні підходи до планування траєкторій активно враховують динамічні обмеження квадрокоптера (кутові швидкості, максимальну тягу, аеродинамічний опір), що дозволяє підвищити ефективність використання енергії на маршруті [2]–[5]. Однак навіть найкращі алгоритми будуть працювати зі втратами, якщо стартова конфігурація апарата має зміщений ЦМ, адже тоді весь політ відбуватиметься в умовах постійної компенсації відхилень.

II. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою є визначення кількісного впливу зміщення корисного вантажу відносно центра мас на енергоефективність квадрокоптера заданої конфігурації. Для досягнення мети поставлено такі завдання: (1) виміряти зміну середнього струму та тривалості польоту для різних положень вантажу; (2) оцінити стабільність апарата за показниками логів (PID-коливання, RMS-помилка кутів); (3) дослідити вплив бокового зміщення; (4) провести оцінку нагріву ESC; (5) сформулювати практичні рекомендації щодо попереднього балансування та розміщення вантажів.

III. ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОНФІГУРАЦІЯ АПАРАТА

Випробування виконувалися на квадрокоптері з такими параметрами: двигуни Gravity X 2812 (900 Kv, безколекторні), контролер польоту SpeedyBee F405 (прошивка Betaflight 4.5), ESC 40 A BLHeli_32; пропелери 8×4″ (8040); акумулятор 6S2P літій-іон ємністю 7800 мА·год (номінальна напруга 21,6 В, вага 900 г); маса апарата без батареї — 850 г; корисне навантаження — 1,0 кг. Орієнтовна злітна маса становила близько 2,75 кг. Корпус дрона має жорстку платформу кріплення вантажу з можливістю перестановки по поздовжній (тангаж) і поперечній (крен) осях.

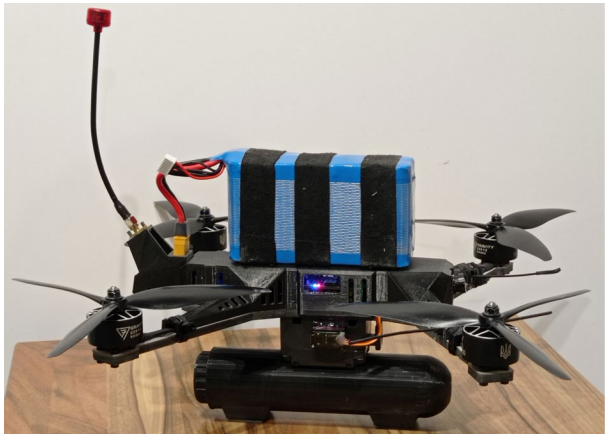


Рис. 1 Зовнішній вигляд досліджуванного квадрокоптера

Налаштування контролера включали стандартні профілі PID із незначним підвищенням D-компоненти по тангажу для кращого демпфування, а також фільтри за замовчуванням (dynamic notch, low-pass) для гвинтів 8040. Тримування нуля по гіроскопу виконувалося перед кожним польотом. Телеметрія струму та напруги знімалася із сенсора живлення та ESC; журнали Blackbox записувалися на SD-карту контролера.

IV. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Було досліджено три базові положення вантажу по поздовжній осі: у центрі мас (0 см), зміщення вперед (+5 см) та назад (−5 см). Додатково виконано серію тестів для бокового зміщення ±5 см по осі крену. Для кожного положення проведено по щонайменше п'ять польотів у режимі висіння та повільного прямолінійного руху на висоті 3–5 м у безвітряних умовах (закрите приміщення).

Кожен виліт тривав до досягнення порогу 3,4 В на елемент (під навантаженням). Фіксувалися показники: середній струм I_avg, піковий струм I_peak, середня напруга U_avg, температура ESC (за внутрішнім датчиком), тривалість польоту t_flight, а також метрики стабілізації за логами Blackbox (амплітуда PID-корекцій, RMS-помилка кутів по тангажу й крену). Перед серіями польотів виконувалося балансування пропелерів і перевірка відсутності вібрацій на частотах понад 200 Гц.

Для зменшення впливу деградації акумулятора порядок випробувань циклічно змінювали (0 см → +5 см → −5 см → 0 см тощо), а також застосовували контрольні вильоти без вантажу задля оцінки дрейфу показників. Дані агрегувалися у табличній формі, обчислювалися середні значення та стандартні відхилення; для порівняння груп застосовували t-тест (α=0,05).

V. ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ОЧІКУВАНІ ЕФЕКТИ

У режимі висіння сумарна тяга ΣT дорівнює вазі апарата: $\Sigma T \approx m \cdot g$. При зміщенні центра мас на відстань Δx по тангажу виникає момент $M \approx m_v \cdot g \cdot \Delta x$ (m_v — маса вантажу), який компенсується диференціюванням тяги між передньою та задньою парами двигунів. Компенсація вимагає нахилу корпуса на кут θ, через що вертикальна складова тяги зменшується, а сумарна тяга має зрости, щоб зберегти висоту. Для малих кутів додаткові втрати потужності можна оцінити як $\delta P/P \approx \theta^2/2$.

У реальній системі додаються втрати від збільшених токів у двох ESC, а також нелінійності аеродинаміки гвинтів 8040. Плани траєкторій, що враховують обмеження за кутовими швидкостями та опір повітря, демонструють виграш у енергоефективності порівняно з наївними траєкторіями [2], [4], проте у випадку постійного зміщення ЦМ контролер витрачає енергію на безперервну компенсацію. Тому прогнозується приріст I_avg у межах 10–20 % для $\Delta x \approx 5$ см (за інших рівних), а також підвищення температури ESC на стороні компенсації.

VI. ОБРОБКА ДАНИХ ТА ОЦІНКА ПОХИБОК

Сирі логи Blackbox конвертовано в табличний формат із подальшою агрегацією по 1-секундних інтервалах. Зі значень струму вилучалися короткі піки тривалістю <50 мс як артефакти, не пов'язані з усталеним режимом. Похибку вимірювання струму оцінювали за паспортними даними сенсора (±2 %) і додатковим порівнянням з еталонним амперметром (±1 %). Температура ESC має похибку до ±2 °C. Для тривалості польоту невизначеність визначалась через варіабельність навантаження і напруги на елементах; її оцінено як ±2 %. Порівняння середніх виконувалося двовибірковим t-тестом із припущенням нормальності розподілу (перевірено тестом Шапіро—Уїлка). Вплив порядку польотів мінімізували блочною рандомізацією серій.

VII. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для центрального положення (0 см) середній струм становив I_avg=17,8 А при $U_avg \approx 21{,}0$ В, тривалість польоту $t_flight \approx 8$ хв 40 с. Зміщення вантажу вперед на +5 см призвело до зростання I_avg до 20,3 А (≈+14,0 %) і скорочення t_flight до ≈7 хв 12 с (−16,5 %). Зміщення назад −5 см дало $I_avg \approx 21{,}0$ А (≈+18,0 %) і $t_flight \approx 6$ хв 55 с (−20,2 %). Різниця між 0 см та ±5 см статистично значуща ($p<0{,}05$).

Аналіз Blackbox показав зростання амплітуди PID-корекцій по тангажу на 15–22 % для Δx=±5 см; RMS-помилка кута збільшилася на 0,6–0,9°. Температура ESC на стороні, що компенсує момент, підвищувалася до 8–10 °C над середньою, що узгоджується з очікуваннями моделі.

Для бокового зміщення (±5 см по крену) приріст I_avg становив 9–15 %, при цьому збільшення PID-активності реєструвалося переважно по крену; час польоту зменшувався на 8–14 %. Сумарно поздовжнє зміщення дало дещо більший негативний ефект через особливості геометрії рами та розподілу мас.

VIII. Обговорення результатів

Експериментальні результати підтвердили гіпотезу про домінуючий вплив центрованості вантажу на енергоефективність. Навіть для порівняно невеликого відхилення (5 см) система переходить у режим постійної компенсації, що проявляється у збільшенні середнього струму та деградації часу польоту. На практиці це означає, що невірне кріплення сенсорних модулів, камер або корисних вантажів здатне зменшити тривалість місії на хвилини без жодних змін у силовій установці та акумуляторі.

З погляду теорії керування та планування руху, відомі підходи до генерації траєкторій враховують динамічні обмеження й аеродинамічний опір [2], [4], проте вони не усувають фундаментальні втрати від незбалансованого ЦМ. Навпаки, планувальник вимушений працювати в умовах зміщеного рівноважного кута, що знижує запас по тягові та збільшує енергетичні витрати на маневрування [3], [5].

Отримані значення приросту I_avg у межах 10–22 % узгоджуються з якісними оцінками моделі ($\delta P/P \approx \theta^2/2$ для малих кутів) та практичним досвідом експлуатації. Виявлене підвищення температури ESC добре корелює з асиметрією струмів, що має значення для довговічності компонентів.

IX. Практичні рекомендації для інженерів та операторів

- Розміщуйте корисний вантаж максимально близько до геометричного центра мас рами; використовуйте рейкові вузли з міліметровою шкалою.
- Перед польотом перевіряйте тримування апарата: у висінні без вітру кут тангажу/крену має бути близьким до нуля; за відхилення >1° — виконайте корекцію розміщення вантажу або тримування.
- Моніторте телеметрію ESC: різниця середніх струмів між протилежними моторами >10 % — індикатор розбалансування.
- Для довгих місій використовуйте стропи/ланцюги із фіксованим положенням вантажу та демпферами 70–80 Shore A, щоб уникати мікрозсувів під час маневрів.
- За наявності автопланування польоту (mission planner) обирайте траєкторії з обмеженням кутів й кутових швидкостей; це зменшує середній θ і відповідно енергетичні втрати [2]–[5].

X. Обмеження дослідження та напрями подальших робіт

Робота проводилася у закритому приміщенні без вітру, що виключає вплив поривів і температурних градієнтів. Результати можуть відрізнятися для інших рам, моторів, пропелерів і типів акумуляторів (наприклад, LiPo 6S із вищою віддачею струму). У цій роботі не розглядалася віброізоляція вантажу, що здатна впливати на фільтрацію сигналів IMU і, відповідно, на PID-активність. Також не досліджено вертикальне зміщення вантажу (по осі Z), яке може змінювати моменти інерції та впливати на керованість.

Подальші дослідження планується присвятити автоматизованому динамічному балансуванню (рухомі платформи/каретки), оцінці впливу Δx у діапазоні 0–10 см для вантажів 0,5–1,5 кг, а також польотам із траєкторним плануванням, що мінімізує інтегральну енергію з урахуванням аеродинамічного опору [4].

XI. Висновки

1) Навіть невелике зміщення вантажу (±5 см) призводить до статистично значущого зростання середнього споживаного струму на 10–22 % та зменшення тривалості польоту на 10–18 %. 2) Центральне розміщення вантажу забезпечує мінімальні втрати енергії, нижчий рівень PID-активності та менший нагрів ESC. 3) Отримані дані узгоджуються з фундаментальними підходами до проєктування та керування БПЛА [1], [2] і з сучасними методами траєкторного планування [3]–[5]. 4) Практичне передпольотне балансування є простим і ефективним способом підвищити енергоефективність без апаратних змін.

Література

[1] Austin, R. Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment. Wiley, 2010.

[2] Mellinger, D., Michael, N., & Kumar, V. Trajectory Generation and Control for Precise Aggressive Maneuvers with Quadrotors. The International Journal of Robotics Research, 31(5), 2012.

[3] Liu, S., Mohta, K., Atanasov, N., & Kumar, V. Search-based Motion Planning for Aggressive Flight in SE(3). arXiv:1710.02748, 2017.

[4] Zhang, H., Srikanthan, A., Folk, S., Kumar, V., & Matni, N. Why Change Your Controller When You Can Change Your Planner: Drag-Aware Trajectory Generation for Quadrotor Systems. arXiv:2401.04960, 2024.

[5] Tang, L., Wang, H., Li, P., & Wang, Y. Real-time Trajectory Generation for Quadrotors using B-spline based Non-uniform Kinodynamic Search. arXiv:1904.12348, 2019.

Визначення параметрів рухомого вікна для опрацювання сигналу віброакселерометра

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.118

Роман Федоришин
Національний університет «Львівська політехніка»,
Львів, Україна
roman.m.fedoryshyn@lpnu.ua

Василь Лимич
Національний університет «Львівська політехніка»,
Львів, Україна
vasyl.v.lymych@lpnu.ua

Анотація — ***запропоновано метод опрацювання сигналу віброакселерометра для оцінки завантаженості кульового барабанного млина. На основі експериментальних спектрів синтезовано часові сигнали за допомогою оберненого перетворення Фур'є та визначено оптимальні параметри рухомого вікна для побудови спектрів методом швидкого перетворення Фур'є. Запропоновано критерій оптимальності, що поєднує точність відтворення спектральних характеристик та ефективність використання ресурсів мікропроцесорної системи.***

Ключові слова — кульовий барабанний млин; віброакселерометр; завантаженість млина; частотні спектри; рухоме вікно; перетворення Фур'є.

I. Вступ

Аналіз сигналів віброакселерометра дає достовірну інформацію про стан механічних систем і часто використовується в промисловості для контролю завантаження кульових барабанних млинів [1]. Дослідження вібрацій дозволяє оцінити рівень заповнення, що сприяє оптимізації роботи, зниженню енергоспоживання та зносу обладнання. Перехід від часового сигналу до частотного спектру підвищує ефективність аналізу, оскільки амплітудні відхилення стають більш очевидними. Для цього застосовують швидке перетворення Фур'є (ШПФ) [2].

На рисунках 1 і 2 наведено частотні спектри сигналів для порожнього та повного млина, і їх залежність від рівня завантаженості [3]. З аналізу видно, що зі збільшенням заповнення амплітуда сигналу зменшується. Корисний спектральний діапазон становить 2 – 6 кГц.

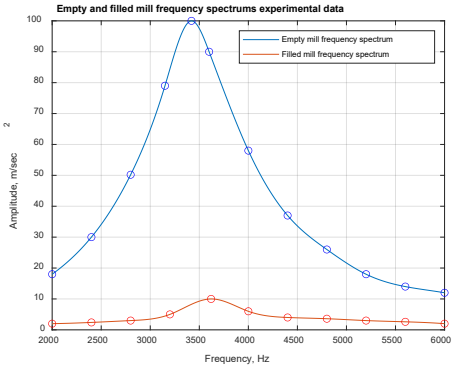


Рис. 1. Частотні спектри сигналу віброприскорення для порожнього (синя крива) та повного (червона крива) млина

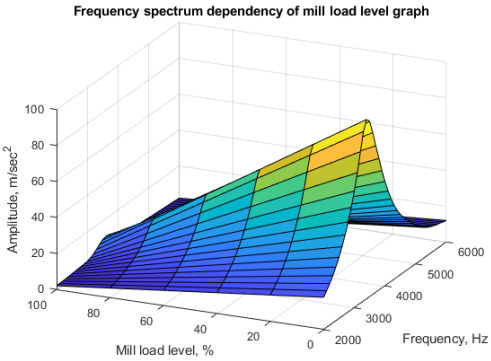


Рис. 2. Залежність частотного спектру від завантаженості млина

II. Основні результати дослідження

На основі експериментально отриманих точок частотного спектру відтворимо часовий сигнал віброприскорення, після чого з цього синтезованого сигналу побудуємо частотний спектр для порівняння з початковими даними. Ці операції виконаємо в середовищі Matlab із використанням функції ifft, яка реалізує зворотне перетворення Фур'є.

Для коректного синтезу часового сигналу необхідно визначити частоту дискретизації та кількість точок сигналу. Відповідно до теореми Найквіста, частота дискретизації цифрового сигналу повинна бути щонайменше удвічі більшою за максимальну частоту аналогового сигналу на вході системи [4], [5]. З рисунку 1 видно, що найвища частота сигналу віброприскорення становить 6 кГц, що відповідає частоті Найквіста 12 кГц. Відповідно до рекомендацій виробників вимірювального обладнання [4], [5], для забезпечення високої точності дискретизації доцільно подвоїти цю частоту. Отже, для синтезу часових сигналів вибрано такі параметри:

- частота дискретизації: 24 кГц;
- кількість точок сигналу: 12000;
- тривалість сигналу: 0,5 с.

Синтезовані часові сигнали та спектри для порожнього й повного млина (рисунки 3 та 4), побудовані за допомогою fft, добре узгоджуються з експериментальними даними, що підтверджує коректність застосування прямого та зворотного перетворення Фур'є.

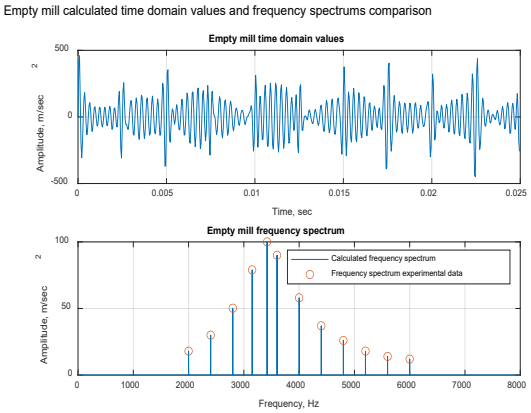


Рис.3. Часовий сигнал віброприскорення і порівняння розрахованого частотного спектру з експериментальними даними для порожнього млина

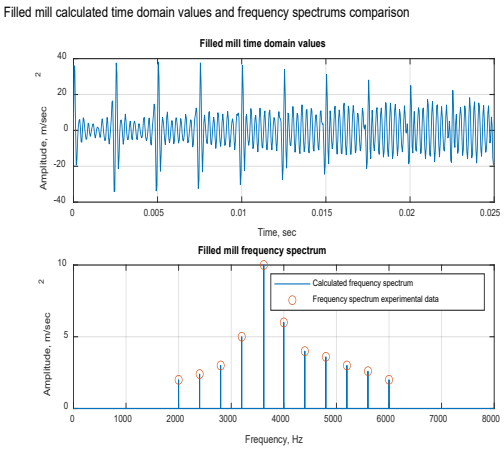


Рис.4. Часовий сигнал віброприскорення і порівняння розрахованого частотного спектру з експериментальними даними для повного млина

Введемо умовне позначення T_{win}, яке характеризує оптимальний розмір рухомого вікна у секундах. Аналіз рисунків 3 та 4 показує, що період одного циклу сигналу віброприскорення дорівнює 2,5 мс. Теоретично це відповідає мінімально допустимому розміру рухомого вікна для побудови частотного спектру. Для дослідження впливу розміру вікна на спектральні характеристики проведемо побудову частотних спектрів порожнього та повного млина для різних значень T_{win} (рисунки 5 та 6).

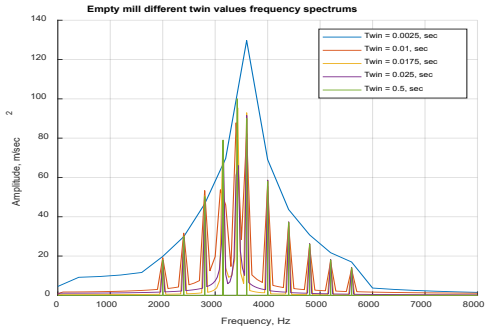


Рис. 5. Частотні спектри при різних значеннях Twin для порожнього млина

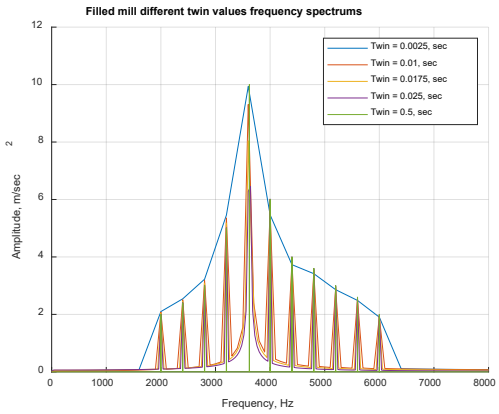


Рис. 6. Частотні спектри при різних значеннях Twin для заповненого млина

Аналіз рисунків 5 та 6 дозволяє зробити такі висновки:

- зі збільшенням значення T_{win} якість побудованого частотного спектру покращується;
- при T_{win} = 2,5 мс (що відповідає періоду одного циклу сигналу віброприскорення) якість спектру є незадовільною;
- при T_{win} = 25 мс спектр набуває форми, близької до спектру, побудованого для повної тривалості сигналу (T_{win} = 500 мс). Тому це значення можна вважати нижньою межею розміру рухомого вікна для подальшого пошуку оптимальних параметрів.

Для пошуку оптимального розміру рухомого вікна введемо умовні позначення:

- n_{win} – кількість точок у рухомому вікні;
- n_{win}' – нормоване значення кількості точок у рухомому вікні;
- s – площа під частотним спектром, м/с³;
- s' – нормоване значення площі під частотним спектром.

Нормовані значення n_{win}' та s' визначаються за відповідними формулами:

$$n_{win}' = n_{win}/\max(n_{win}), \quad (1)$$

$$s' = s/\max(s). \quad (2)$$

Для визначення верхньої межі рухомого вікна розглянемо графіки зміни завантаженості млина при зміні подачі вугілля, швидкості зміни завантаженості, а також оберненого значення цієї швидкості (рисунки 7 – 9).

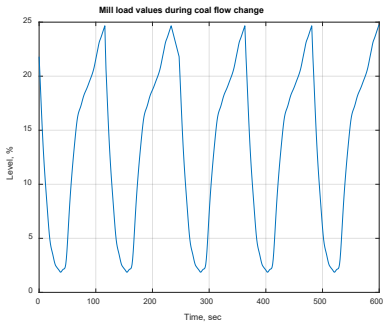


Рис. 7. Зміна завантаженості млина при зміні подачі вугілля [6]

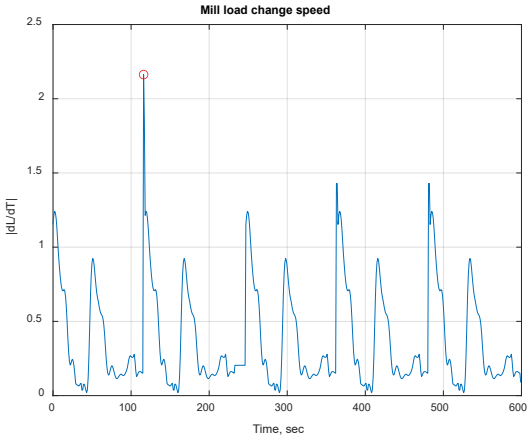


Рис. 8. Швидкість зміни завантаженості млина (о – точка максимальної швидкості)

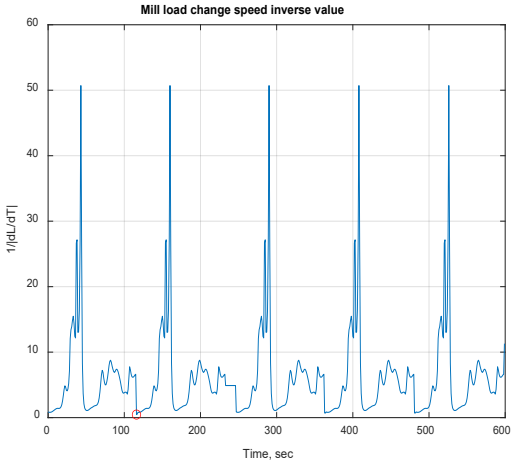


Рис. 9. Обернені значення швидкості зміни завантаженості млина (о – мінімальний період часу, за який завантаженість млина може змінитись на 1%)

З рисунку 8 видно, що максимальна швидкість зміни завантаженості млина дорівнює 2,16 %. Відповідно до цього значення, мінімальний час, за який завантаженість млина може змінитися на 1% при максимальній швидкості, наведено на рисунку 9. Цей інтервал часу приймаємо за верхню межу розміру рухомого вікна для побудови частотних спектрів. У розглянутому випадку він становить 462 мс.

Використовуючи визначені нижню та верхню межі тривалості рухомого вікна, побудуємо залежності $n_{win}'(T_{win})$, $s(T_{win})$ та $s'(T_{win})$ (рисунки 10 та 11). Крок збільшення розміру рухомого вікна прийнято рівним мінімальній тривалості, тобто 25 мс.

Аналіз рисунків 10, 11 показує, що зі збільшенням T_{win} значення s зменшується, а n_{win} зростає.

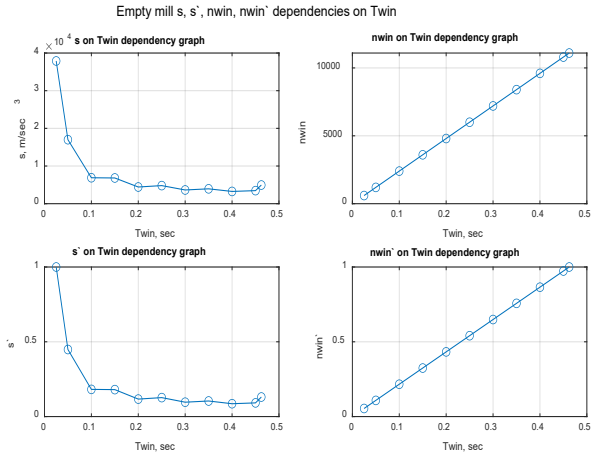


Рис. 10. Залежності: nwin'(Twin), nwin'(Twin), s(Twin), s'(Twin) для порожнього млина

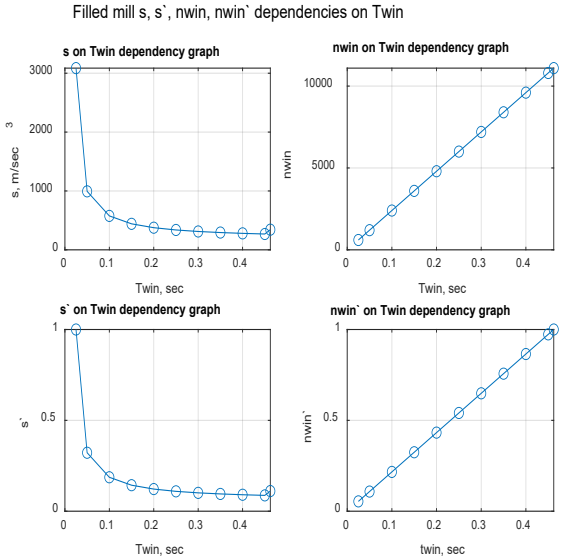


Рис. 11. Залежності: $n_{win}'(T_{win})$, $n_{win}'(T_{win})$, $s(T_{win})$, $s'(T_{win})$ для заповненого млина

Для визначення оптимальних значень T_{win} використаємо наступний критерій оптимальності:

$$I = s' + n_{win}'. \qquad (3)$$

Значення критерію оптимальності для порожнього та заповненого млина зображені на рисунках 12 та 13 відповідно, з яких видно, що мінімальне значення критерію оптимальності для порожнього та заповненого млина спостерігається при T_{win} = 100 мс. Тому це значення приймаємо за оптимальний розмір рухомого вікна для побудови частотного спектру.

Відповідні частотні спектри порожнього та заповненого млина при T_{win} = 100 мс наведено на рисунках 14 та 15.

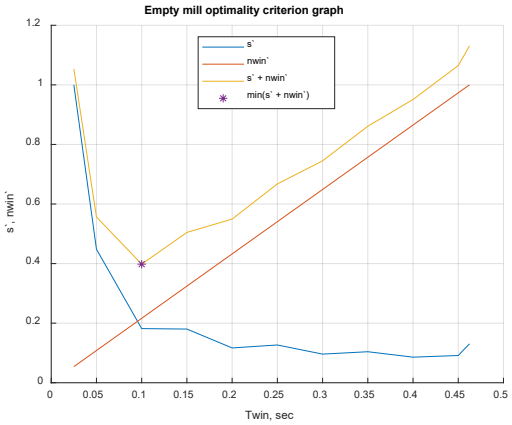


Рис. 12. Значення критерію оптимальності для порожнього млина

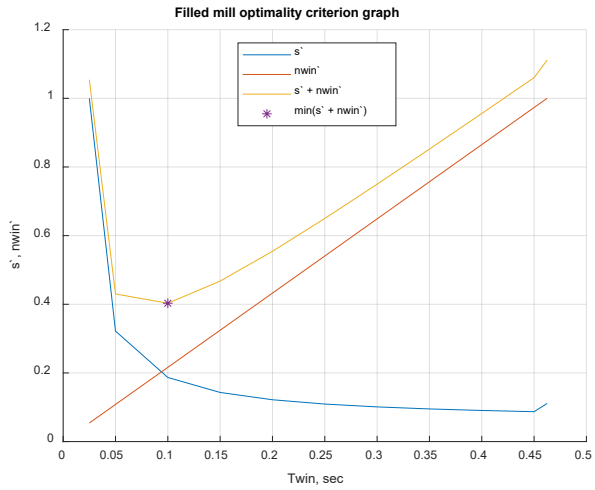


Рис. 13. Значення критерію оптимальності для заповненого млина

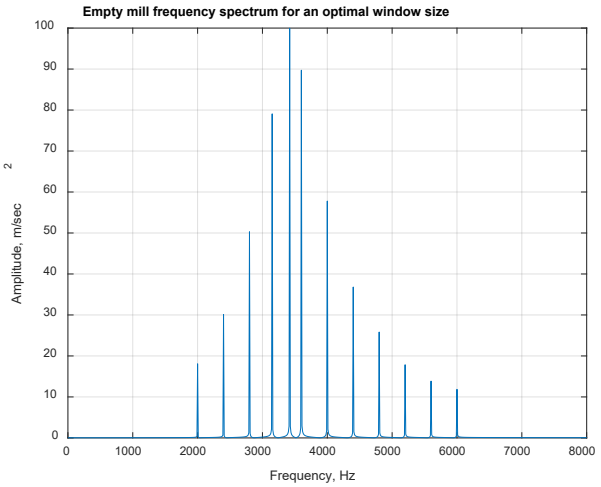


Рис. 14. Частотний спектр порожнього млина для оптимального розміру рухомого вікна

Крок переміщення рухомого вікна доцільно встановити на рівні 50 мс. У цьому випадку вікно буде зміщуватися по часовому сигналу з 50% перекриттям. Протягом 50 мс завантаженість млина може змінитися не більш ніж на 0,1 %, що є повністю прийнятним значенням.

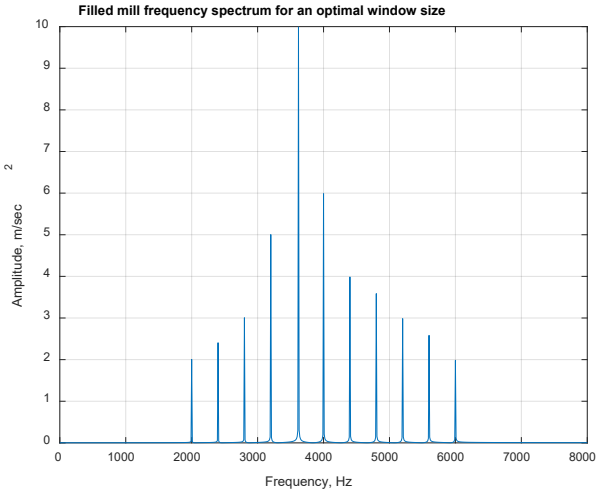


Рис. 15. Частотний спектр заповненого млина для оптимального розміру рухомого вікна

Висновок

У результаті виконаних досліджень встановлено, що розмір рухомого вікна при опрацюванні сигналу віброакселерометра впливає на якість побудови частотного спектру. Якщо розмір рухомого вікна є занадто малим, то отриманий частотний спектр не буде відповідати реальному і якість побудови спектру буде незадовільною. Занадто велике рухоме вікно потребує більше часу на опрацювання сигналу та більше пам'яті для зберігання відліків рухомого вікна, що веде за собою необхідність збільшення обчислювальних ресурсів мікропроцесорної системи. В даній роботі на основі аналізу частотних спектрів сигналу віброприскорення для заповненого та порожнього млина розроблено методику визначення оптимального розміру рухомого вікна, яка базується на інтегральному критерії оптимальності, що враховує якість побудови частотного спектру та вплив розміру рухомого вікна на ресурси та продуктивність мікропроцесорної системи.

Список використаних джерел

[1] Huang, P., Jia, M. & Zhong, B. (2014). Study on the method for collecting vibration signals from mill shell based on measuring the fill level of ball mill. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2014. Article ID 472315, 10 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2014/472315.

[2] Brigham E. Oran. The Fast Fourier Transform and Its Applications. New York: Prentice-Hall, 1988.

[3] Pistun, Y[evhen]; Fedoryshyn, R[oman]; Zagraj, V[olodymyr]; Nykolyn, H[ryhoriy] & Kokoshko, R[oman] (2019). Experimental Study and Mathematical Modelling of Nonlinear Control Plant, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp.0967-0975, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.

[4] R.B. Randall. Frequency Analysis. Bruel & Kjaer, 1987.

[5] Грень Я. Програмування систем реального часу: навч. посібник/ Я. Грень. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 324 с.

[6] Пістун Є. П., Федоришин Р. М., Николин Г. А., Заграй В. С. Побудова математичної моделі кульового барабанного млина із застосуванням отриманих експериментальних даних // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2019. – Вип. 53. – С. 44–55.

Дослідження енергоефективності частотних перертворювачів при автоматизованому керуванні асинхронним електроприводом

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.119

Іван Полховський
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
polkhovskyi_vg24@nuwm.edu.ua

Євгеній Маланчук
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
e.z.malanchuk@nuwm.edu.ua

Сергій Стець
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
s.e.stets@nuwm.edu.ua

Анотація—**В роботі проведений порівняльний аналіз енергоспоживання двох частотних перетворювачів Siemens SINAMICS G120 і SEW-Eurodrive MDX61B при регулюванні швидкості обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в режимі холостого ходу. На основі проведеного експерименту досліджені залежності струму споживання двигуна від швидкості обертання ротора в статичних і динамічних режимах та встановлені особливості алгоритмів керування частотою змінного струму.**

Keywords—**перетворювач частоти змінного струму; автоматизований асинхронний електропривод; енергоефективність; програмований логічний контролер**

I. ВСТУП

Системи автоматизованого керування електроприводом є невід'ємною складовою сучасного промислового виробництва. Ключовими елементами таких систем виступають частотні перетворювачі (ЧП), що забезпечують регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів шляхом зміни частоти та амплітуди напруги живлення [1]. Вибір конкретного типу перетворювача суттєво впливає на динамічні характеристики, енергоефективність та інтегрованість приводу в систему автоматизації. Незважаючи на широкий спектр пропозицій від провідних виробників, таких як Siemens, ABB та SEW-Eurodrive, вибір оптимального рішення часто ґрунтується на суб'єктивних або економічних критеріях через брак об'єктивних експериментальних даних. Актуальність даного дослідження полягає у проведенні прямого порівняльного аналізу характеристик популярних моделей ЧП в однакових умовах експлуатації.

II. МЕТА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження ефективності використання та стабільності параметрів двох моделей частотних перетворювачів: SINAMICS G120 [2] та SEW-Eurodrive Movimax MDX61B [5], інтегрованих в єдину систему керування на базі ПЛК Siemens S7-1200 [4]. Об'єктом дослідження обрано асинхронний електродвигун RAVEO RT1A 562-4 [3]. Експериментальний лабораторний стенд (рис. 1) містив у своєму складі:

- Програмований логічний контролер: Siemens S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/DC), що виконував функції формування завдання для швидкості обертання та здійснював збір даних .
- Досліджувані частотні перетворювачі:

  Siemens SINAMICS G120 з силовим модулем PM240-2 (6SL3210-1PB13-0AL0);

  SEW-Eurodrive Movimax MDX61B (MDX61B0005-5A3-4-0T/DFE32B).
- Систему моніторингу: енкодер для вимірювання швидкості обертання та вбудовані засоби ЧП для вимірювання струму.

Зв'язок ПЛК з перетворювачами був реалізований через єдину промислову мережу PROFINET.



Рисунок 1. Експериментальний лабораторний стенд.

Вимірювання струму, споживаного двигуном, проводилося безпосередньо частотними перетворювачами з подальшим зчитуванням та передачею через ПЛК на ПК. Експеримент передбачав циклічну зміну швидкості двигуна (від 0 до 1500 об/хв) для оцінки як статичних, так і динамічних характеристик.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ АНАЛІЗ

У режимі очікування (0 об/хв) виявлено суттєву різницю у власному струмі споживання ЧП. Перетворювач SINAMICS G120 продемонстрував значення в діапазоні 0.0015 – 0.0024 А, тоді як SEW MDX61B – стабільно 0.004 А. Ця різниця свідчить про нижчі втрати в силовому модулі частотного перетворювача Siemens у режимі простою, що може бути важливим для систем з тривалими паузами в роботі.

Дослідження в усталеному режимі при заданій швидкості обертання двигуна проводилися без навантаження. Результати вимірювань представлені в Таблиці 1.

ТАБЛИЦЯ 1. ПОРІВНЯННЯ СТРУМІВ ХОЛОСТОГО ХОДУ У СТАЛОМУ РЕЖИМІ

Швидкість, об/хв	Струм SINAMICS G120, А	Струм SEW MDX61B, А
100	0.635	0.496
300	0.655	0.474
500	0.621	0.474
700	0.567	0.474
900	0.544	0.475
1200	0.528	0.474
1500	0.521	0.474

Аналіз даних виявив принципово різні характеристики: - перетворювач SEW MDX61B демонструє високу стабільність значень струму (0.474 А) майже у всьому діапазоні швидкостей (рис. 2), що вказує на оптимізовані алгоритми керування; - для перетворювача SINAMICS G120 (рис. 3) спостерігається чітко виражена залежність струму від швидкості: зі зростанням обертів від 100 до 1500 об/хв струм плавно зменшується з 0.635 А до 0.521 А. Така поведінка може бути пов'язана з особливостями реалізації V/f характеристики.

У динамічних режимах (розгін та гальмування) обидва частотні перетворювачі продемонстрували коректну роботу без небезпечних викидів струмів.

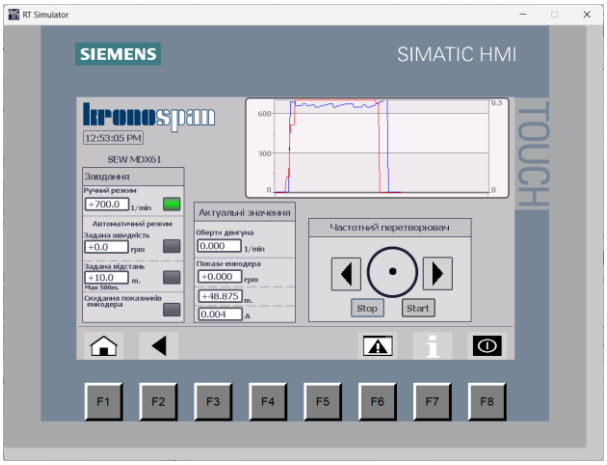


Рисунок 2. Графік залежності швидкості обертання (червоний графік) та струму двигуна (синій графік) від часу для частотного перетворювача SEW MDX61B на швидкості 700 об/хв [6].

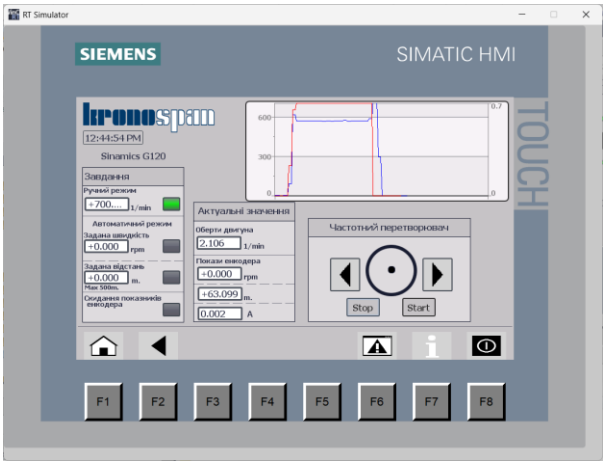


Рисунок 3. Графік залежності швидкості обертання (червоний графік) та струму двигуна (синій графік) від часу для частотного перетворювача SINAMICS G120 на швидкості 700 об/хв [6].

Дослідження перетворювачів в динаміці також виявили деякі відмінності у споживанні електроенергії, а саме:

- SINAMICS G120: Забезпечував різкий розгін із вищим пусковим струмом (до 0.74 А при розгоні до швидкості 300 об/хв)
- SEW MDX61B: характеризувався більш плавною динамікою з меншими пусковими струмами (до 0.57 А при аналогічному

розгоні до швидкості 300 об/хв), що позитивно впливає на механічні частини приводу та зменшує навантаження на мережу.

IV. ВИСНОВКИ

Проведені експериментальні дослідження дозволили отримати об’єктивні порівняльні дані щодо характеристик частотних перетворювачів Siemens SINAMICS G120 та SEW-Eurodrive Movimax MDX61B.

У режимі очікування перетворювач SINAMICS G120 виявився більш енергоефективним, демонструючи значно нижчі струми втрат. Це робить його кращим вибором для систем із тривалими періодами простою.

В усталеному режимі роботи перевага за критерієм стабільності споживання струму належить перетворювачу SEW MDX61B, який підтримував практично незмінне значення струму в широкому діапазоні швидкостей, що свідчить про високоякісні алгоритми керування.

У динамічних режимах вибір залежить від вимог технологічного процесу: SINAMICS G120 забезпечує швидший розгін, а SEW MDX61B – більш плавну роботу. Дані параметри можна налаштовувати на частотному перетворювачі окремо, змінюючи час розгону та гальмування.

Таким чином, вибір оптимального частотного перетворювача для технологічних процесів з автоматизованим асинхронним електроприводом змінного струму є багатокритеріальним завданням. Отримані результати вказують на те, що при проектуванні і використанні систем частотного керування швидкістю двигунів змінного струму сам частотний перетворювач потребує проведення додаткових досліджень і налаштувань з метою створення енергоефективних, надійних та продуктивних систем автоматизованого електроприводу.

Подальші стендові дослідження енергоефективності перетворювачів частоти плануються для режиму навантаження з різними обертовими моментами та видами самого навантаження електродвигуна.

Література

[1] Ковальов О. В., Семенов О. О. Електропривід змінного струму: навчальний посібник [Електронний ресурс] / О. В. Ковальов, О. О. Семенов. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 183 с. Retrieved from https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/29209/9300.pdf?sequence=3

[2] Siemens AG. SINAMICS G120 Operating Instructions PM240-2 Power Modules. Retrieved from https://cache.industry.siemens.com/dl/files/104/109801104/att_1077039/v1/G120_PM240-2_hw_inst_man_0621_en-US.pdf

[3] Raveo. *AC MOTORY* [Електронний ресурс]. – 2016. Retrieved from https://www.raveo.cz/productmanager/wp-content/uploads/2023/01/ac-motory-raveo-2016-11_0.pdf

[4] Siemens AG. SINAMICS G120 Operating Instructions PM240-2 Power Modules. Retrieved from https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:48fca72b-670d-40f6-aa0d-f25cef30e33c/SINAMICSG120-Manual-de-instalacao-PM240-2-EN_original.pdf

[5] SEW-EURODRIVE. MOVIDRIVE® MDX60B/61B System Manual. Retrieved from https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/16838017.pdf

[6] Папка на Google Диску: *Експериментальні результати досліджень. Retrieved from https://drive.google.com/drive/folders/1okbtEYKP66xNRHUnTIcCVw_K0ZpKqxqP*

Придушення коливань механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.120

Владислав Поляков
Інститут транспортних систем та технологій НАН України
Відділ динаміки та міцності нових видів транспорту
Дніпро, Україна
pva78125@gmail.com

Анотація – ***Конструювання бажаних рухів механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда можливо шляхом комбінування керування корисними компонентами її стану з придушенням небажаних. Придушення небажаних рухів має здійснюватися способами, що залежать від вихідних передумов щодо внутрішньої та зовнішньої обстановки рухів і може бути як пасивним, так і активним. Переходити до активного придушення слід лише за недостатньої ефективності пасивного. Придушення небажаних рухів раціонально забезпечувати шляхом створення передумов інваріантності координат, що представляють ці рухи, щодо збурень, які ігноруються, та ізоляції таких координат від впливів, які руйнують шукану інваріантність. Створена методика вказаного типу придушення.***

Ключеві слова – магнітолевітуючий поїзд; механічна підсистема; придушення рухів; інваріантність координат; ізоляція координат; автономність каналів; принцип двоканальності.

I. Вступ

Цілеспрямованість руху механічної підсистеми (МП) магнітолевітуючого поїзда (МЛП) досяжна шляхом комбінування керування його корисними компонентами з придушенням паразитних (безкорисних та шкідливих) компонентів.

Придушення небажаних рухів може бути як пасивним, так і активним. Натурна реалізація методів активного придушення, які нині використовуються, незрівнянно більш складна і ресурсозатратна в порівнянні з пасивними. Тому переходити до активного придушення слід лише у разі недостатньої ефективності пасивного.

II. Мета і методика роботи

Пригнічення паразитних рухів досліджуваної підсистеми здійснюється способами, що залежать від вихідних передумов щодо внутрішньої та зовнішньої обстановки таких рухів. Якщо передбачається детермінований, або стохастичний характер силових, параметричних, структурних та інших збурень МП поїзда, то демпфування її коливань раціонально здійснювати методами загальної теорії коливань [1, 2], або статистичної динаміки [3, 4] відповідно. Реально ж згадані збурення непередбачувані, тобто щодо них нічого, або майже нічого, не відомо. Тоді задачу придушення паразитних рухів МП МЛП раціонально вирішувати методами теорії інваріантності [5] шляхом знаходження умов, що гарантують незалежність координат від певних збурень. Мається на увазі селективна інваріантність таких координат за мінімально можливих складності системи та обсягу інформації про її збурення. Пригнічення паразитних рухів повинно здійснюватися автоматично. Тому особливо актуальними є питання забезпечення умов грубості системи, вимог її асимптотичної стійкості тощо.

III. Хід виконання і результати роботи

Пригнічення паразитних рухів МП може забезпечуватися інваріантністю координат, що представляють зазначені рухи, щодо збурень, які ігноруються, а також ізоляцією таких координат від впливів, що руйнують шукану інваріантність. Моделі збуреного руху підсистеми, що розглядається, може бути надано вигляду

$$a_{\lambda\mu}\cdot\eta^{\mu}=E_{\lambda};$$

$$a_{\lambda\mu}=c_{\lambda\mu}\cdot p^{(2)}+(C_{\lambda,\mu\nu}\cdot\eta^{\nu}+\beta_{\lambda\mu})\cdot p+l_{\lambda\mu};$$

$$p=\frac{d}{dt}\quad\forall\ \lambda,\mu,\nu\in[\overline{1,L}],\qquad(1)$$

де $\eta^{\mu}\ \forall\ \mu\in[\overline{1,L}]$, L – узагальнені координати розрахункової схеми підсистеми, а також число таких координат;

$c_{\lambda\mu}, C_{\lambda,\mu\nu}\ \forall\ \lambda,\mu,\nu\in[\overline{1,L}]$ – коваріантний метричний тензор згаданого агрегату, а також його триіндексний символ Крістоффеля 1-го роду;

$\beta_{\lambda\mu}$, $l_{\lambda\mu}\ \forall\ \lambda,\mu\in[\overline{1,L}]$ – дисипативні та квазіпружні коефіцієнти наведеної моделі;

$E_{\lambda}\ \forall\lambda\in[\overline{1,L}]$ – зовнішні складові збурень його узагальнених координат.

Вплив j -го збурення E_j на i -у координату може бути охарактеризовано за допомогою мінора D_{ji} головного детермінанта наведеної моделі. Тому умова інваріантності η^{i} щодо E_j може бути записана у формі тотожньої рівності

$$D_{ji}\equiv 0\,.\qquad(2)$$

Якщо модель (1) є упорядкованою (тобто збігаються порядкові номери її рівнянь та номери узагальнених координат, для яких вони складені), то операторні коефіцієнти $a_{\lambda\lambda}\forall\lambda\in[\overline{1,L}]$ характеризують динамічні якості сепаратних каналів системи. Коефіцієнти ж $a_{\lambda\mu}\forall\lambda\neq\mu$ $\lambda,\mu\in[\overline{1,L}]$ характеризують взаємодію таких каналів. Тому умова автономності i -го та j -го каналів має вигляд

$$a_{ij}\equiv 0;\ \ i\neq j. \tag{3}$$

Співвідношення (2) і (3) дозволяють здійснювати підбір параметрів та структури підсистеми виходячи з критеріїв дотримання інваріантності подавлюваних координат щодо збурень, які ігноруються, а також автономності цих координат щодо дестабілізуючих інваріантність впливів. У той же час, найчастіше значно більш конструктивним є підбір згаданих структури та співвідношень параметрів елементів виходячи з критерію мінімізації чутливості якості процесів у підсистемі до нестаціонарності її параметрів з використанням співвідношень

$$S_{\alpha}^{A}=\frac{\partial A}{\partial\alpha}, \tag{4}$$

де S_{α}^{A} – чутливість показника A до зміни параметра α.

Аналіз співвідношення (2) призводить до висновку, що його реалізація шляхом підбору параметрів підсистеми можлива за дотримання принципу двоканальності [6]: інваріантність координати η^{i} від збурення E_j досяжна, якщо мінор інваріантності D_{ji} є різницею щонайменше двох виразів. Це можливо, якщо E_j впливає на η^{i} не менш ніж по двох каналах за умови дотримання співвідношень

$$K_1(s)=-K_2(s);$$
$$K_T(s)=K_1(s)+K_2(s)=0, \tag{5}$$

де $K_1(s)$, $K_2(s)$, $K_T(s)$ – передавальні функції (у зображеннях за Лапласом) зазначених двох каналів впливу E_j на η^{i}, а також тотального "еквівалентного" каналу такого впливу.

Отже, селективна інваріантність координати η^{μ} щодо збурення E_λ можлива при взаємній компенсації всіх (прямих та непрямих) його впливів на цю координату, а також ізоляції відповідного їй каналу щодо впливів, які не беруть участі у згаданій компенсації.

Співвідношення (1) – (3) дозволяють знаходити загальні умови, що гарантують згадану селективну інваріантність координат підсистеми щодо окремих збурень. Однак ці умови, за різних способів їхнього натурного досягнення, можуть не забезпечувати грубість, асимптотичну стійкість, а також інші необхідні якості підсистеми. Тому проблеми придушення її коливань та надання таких якостей мають вирішуватись у нерозривному зв'язку.

Найбільш повно умови інваріантності можуть бути виконані при комбінованому способі керування [7], при одночасній наявності в підсистемі зв'язків по збуренням (компаундуючих) і по відхиленням (зворотних). При цьому виникає можливість широкої зміни астатизму підсистеми, поза зв'язком із забезпеченням її грубості, стійкості та інваріантності по відношенню до збурень. Крім того, інваріантність у цьому випадку можлива не тільки в режимах руху, що встановився, а й у перехідних. У той самий час (попри властиві їм недоліки), по комплексу властивостей, які враховаються під час вирішення питання про вибір способу придушення небажаних рухів підсистеми, пріоритет у багатьох випадках доводиться віддавати підсистемам лише з компаундуючими зв'язками [8].

Підсистема придушення зі зв'язками за збуренняи є розімкнутою. У ній є принципова можливість досягнення інваріантності пасивно пригнічуваної координати щодо зовнішніх збурень. Однак, при неодмінному дотриманні обмежувальних умов типу (3), в підсистемі тільки з компаунуючими зв'язками, остаточне рішення щодо варіанту натурної реалізації МП поїзда може прийматися виходячи з інших критеріїв.

Однозначне вирішення питання структурної селективної інваріантності аналізованої підсистеми по будь-якій з її координат неможливо також виходячи тільки з умов типу (2). З одного боку, не будь-яка структура системи припускає можливість їх виконання. І, водночас, далеко ще не будь-яка структура, яка допускає це виконання, досить раціональна до ухвалення її як такої, що підлягає натурному втіленню (та й у принципі може бути реалізована, виходячи з конструктивним міркувань). Тому для дотримання умов (5) за наявності в підсистемі лише одного природного шляху впливу, що збурює, повинен бути сформований другий (як мінімум) штучний, що є компаундуючим зв'язком. Такі зв'язки слід організовувати (або використовувати в їх якості наявні дублюючі ланцюжки впливу) по кожному зі збурень, щодо яких ця координата має бути інваріантною. Іншим способом досягнення інваріантності за "другорядними" збуреннями є створення по них зворотних (а не компаундуючих) зв'язків.

Основними перевагами систем придушення з компаундуючими зв'язками, як відомо [5], є їхня швидкодія та простота технічної реалізації (а, отже, мала ресурсомісткість при створенні та експлуатації). У той же час, як випливає з викладеного, точність компенсації впливів, що збурюють (а тому і стабілізації координат), в таких системах радикально залежить від прецизійності дотримання умов типу (5). Передавальні функції ланцюжків впливу, що є компонентами цих виразів, функціонально залежать, зрештою, від параметрів елементів натурного об'єкта. Тому їхня

нестабільність (дрейф) веде до дестабілізації координат підсистеми, яка керується за збуреннями.

Досить раціональний компроміс між результуючою якістю придушення паразитних рухів підсистеми, з одного боку, і складністю, а також витратністю при її створенні та експлуатації з іншого, може бути досягнуто у разі, коли таке придушення здійснюється шляхом інваріантності до ε [6]. При цьому, внаслідок неточності виконання (з різних причин) умов інваріантності, значення координат η^{κ}, які стабілізуються, відрізняються від необхідних на ненульові, такі, що апріорно задаються при проектуванні, величини ε_{κ}, а питанням забезпечення фізичної здійсненності, стійкості і грубості підсистеми має бути приділено особливу увагу. Останнє викликано тим, що у такого роду підсистемах, внаслідок зазначеної наближеності виконання умов інваріантності, стабілізацію (з точністю хоча б до ε_{κ}) можна гарантувати лише для складових відповідних парціальних рухів, які є встановившимися (вимушеними), але не перехідними (власними). При частковій інваріантності суттєве спрощення та здешевлення підсистеми досягається деяким погіршенням якості процесів у ній (особливо перехідних). Однак, при гарантованому дотриманні умов відповідності зазначеним вимогам фізичної здійсненності, стійкості, грубості, а також іншим фундаментальним властивостям такий компроміс є цілком виправданим.

Умови (2) і (5) є необхідними для забезпечення інваріантності, але їхнє дотримання не гарантує її реалізованість. Для забезпечення ж реалізованості інваріантності необхідне дотримання співвідношення

$$D(s)_{sep} \neq 0, \tag{6}$$

де $D(s)_{sep}$ – головний детермінант моделі руху підсистеми (у зображеннях за Лапласом), розімкнутої в точці вимірювання пригнічуваної координати. Тобто для фізичної реалізованості інваріантності необхідно, щоб матриця цієї моделі в розімкнутому стані, після врахування такої інваріантності, не ставала особливою.

Дотримання умов (6) також не гарантує фізичну реалізованість інваріантності. Достатні ж умови такої реалізованості (умови параметричної інваріантності) пов'язані з фактичною здійсненністю вимог структурної інваріантності за допомогою лише фізично здійсненних елементів підсистеми. Тоді згадані достатні умови фізичної здійсненності інваріантності зводяться до реалізованості всіх елементів підсистеми, які доставляють їй таку інваріантність, і тому можуть бути формалізовані співвідношеннями [9, 10]

$$n_{\zeta} \leq p_{\zeta} \;\; \forall \, \zeta \in [\overline{1, E}], \tag{7}$$

де n_{ζ}, p_{ζ}, E – число нулів і полюсів передавальної функції $K_{\zeta}(s)$ ζ-го елемента підсистеми, а також число в ній таких елементів.

При виконанні умов інваріантності групи членів характеристичного рівняння моделі руху (1) перетворюються в нуль, тобто це характеристичне рівняння вироджується. Якщо ступінь цього виродженого характеристичного рівняння виявиться нижчим від ступеня вихідного, то система при виконанні умов інваріантності (особливо з точністю до ε) виявиться заздалегідь "негрубою" [11] так як поява навіть малих негативних коефіцієнтів при вищому ступені незалежного параметра, можливе при неточному виконанні умов інваріантності, призводить до втрати стійкості. У такому разі, умова збереження підсистемою властивості грубості і, як наслідок цього, достатнього запасу стійкості при дотриманні критеріїв інваріантності може бути формалізована співвідношенням

$$p_e \geq p_n, \tag{8}$$

де p_e, p_n – ступінь характеристичного рівняння моделі (1) в інваріантному та неінваріантному режимах.

IV. Наукова новизна та практична значимість роботи

Вперше створено методику пасивного придушення першопричини небажаних рухів МП МЛП. Застосування, в процесі конструкторських розробок, цієї методики сприятиме суттєвому підвищенню якості результуючих рухів вказаної підсистеми, водночас, не вимагаючи для цього значного ускладнення, або підвищення ресурсомісткості її проектування та експлуатації.

Література

[1] Krylov N., Bogoliubov N. Introduction to nonlinear mechanics. Princeton University Press, 1949. 106 p.

[2] Marszal M., Witkowski B., Jankowski K., Perlikowski P., Kapitaniak T. Energy harvesting from pendulum oscillations. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2017. № 94, p. 251–256.

[3] Sondipon A., Blanca P. The “damping effect” in the dynamic response of stochastic oscillators. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2016. V. 44, p. 2–17, ISSN 0266-8920, https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2015.09.017

[4] Huang W., Yu G., Xu W., Zhou R. A Stochastic Dynamics Method for Time-Varying Damping Depending on Temperature/Frequency for Several Alloy Materials. *Materials* (Basel). 2024 Mar 5;17(5):1207. doi: 10.3390/ma17051207. PMID: 38473678; PMCID: PMC10934064.

[5] Кулебакин В. С. Теория инвариантности автоматически регулируемых и управляемых систем. Труды 1-го конгресса ИФАК по автоматическому управлению. Т. 1. *Теория непрерывных систем. Специальные математические проблемы*. М.: Изд-во АН СССР. 1961, с. 247–258.

[6] Петров Б. Н. О реализуемости условий инвариантности. *Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах* : Тр. I совещания по теории инвариантности. М., 1959, с 59–80.

[7] Кулебакин В.С. Высококачественные инвариантные системы регулирования. *Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах* : Тр. 1-го совещания по теории инвариантности. М.: Изд-во ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1959, с. 11–39.

[8] Leigh J. R. Control Theory. London: Inst. Electr. Eng., 2004. 297 p.

[9] Zabczyk J. Mathematical Control Theory: an Introduction. Boston: Birkhauser, 1995, 260 p. ISBN 3-7643-3645-5.

[10] Sontag E. D. Mathematical Control Theory. Deterministic Finite Dimensional Systems. New York: Springer, 1998, 317 p. ISBN 978-0-387-98489-6

[11] Nakra B. C. Theory and Applications of Automatic Controls. New Age International, 2005, 321 p.

Сучасні методи ідентифікації тяжких металів у водному середовищі

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.121

Андрій Сафоник
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Олена Полюхович
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
o.o.poliukhovych@nuwm.edu.ua

Михайло Антикало
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
m.m.antykalo@nuwm.edu.ua

Анотація—**Моніторинг вмісту важких металів у водному середовищі є важливою складовою екологічного контролю, оскільки ці елементи мають високу токсичність і здатність до біоакумуляції. У роботі розглянуто сучасні підходи до визначення важких металів у водних зразках, зокрема сорбційні, вольтамперометричні, хроматографічні, спектральні та фотометричні методи. Наведено характеристику їхніх переваг, обмежень і галузей застосування. Окрему увагу приділено використанню модифікованих сорбентів, розвитку твердофазної спектрофотометрії та вдосконаленню обладнання для експресного аналізу.**

Ключові слова—**важкі метали, сорбційний метод, атомно-абсорбційна спектроскопія, вольт-амперометрія, фотометрія, мас-спектрометрія, хроматографія, аналітичний контроль, екологічний моніторинг.**

I. Вступ

Сучасний стан навколишнього середовища значною мірою визначається рівнем техногенного навантаження, спричиненого інтенсивним розвитком промисловості, транспорту та сільського господарства. Однією з найактуальніших екологічних проблем сьогодення є забруднення природних вод важкими металами, які належать до стійких токсикантів, здатних до біоакумуляції та біомагніфікації в трофічних ланцюгах. Навіть у незначних концентраціях ці елементи виявляють мутагенну, канцерогенну та цитотоксичну дію, що становить серйозну загрозу для гідробіонтів, рослин, тварин і людини [1,7].

Важкі метали надходять у водне середовище з промисловими та побутовими стоками, змивами з територій полігонів, підприємств кольорової металургії, машинобудування, хімічної, шкіряної, текстильної промисловості тощо. Їхнє поширення та міграційна здатність залежать від ряду фізико-хімічних факторів: pH, температури, окисно-відновного потенціалу, наявності органічних речовин і суспендованих частинок. Внаслідок складних процесів сорбції, комплексоутворення та осадження важкі метали можуть переходити між розчинною та твердою фазами, що ускладнює їхнє визначення та контроль у реальних пробах.

У зв'язку з цим надзвичайно важливим є застосування високочутливих, селективних та відтворюваних аналітичних методів, здатних виявляти сліди металів у різних середовищах — природних, питних та стічних водах.

Сучасні підходи до визначення важких металів орієнтовані не лише на досягнення високої точності та чутливості, а й на підвищення експресності аналізу, автоматизацію процесів і мінімізацію витрат реагентів. Особливого значення набуває використання модифікованих сорбентів, які дозволяють поєднувати етапи концентрування та аналітичного визначення, а також розробка портативних приладів для польового моніторингу [2, 6].

II. Постановка задачі

Метою дослідження є аналіз та узагальнення сучасних методів визначення важких металів у водних середовищах, оцінка їхніх переваг, недоліків і можливостей застосування для екологічного моніторингу. Для досягнення мети необхідно розглянути фізико-хімічні принципи кожного з методів, їхню чутливість, специфічність, експресність та можливість застосування в польових і лабораторних умовах.

III. Вирішення поставленої задачі

Серед широкого спектра методів визначення важких металів провідне місце посідають сорбційні технології. Вони дозволяють концентрувати мікрокомпоненти з великих об'ємів проб, знижуючи межу виявлення. Удосконалення сорбентів — важливий напрям сучасних досліджень. Розробляються дешеві та ефективні матеріали на основі природної сировини (деревні відходи, лушпиння ячменю), а також неорганічні матриці, модифіковані реагентами, які забезпечують селективне вилучення металів [3, 4].

Серед електрохімічних методів особливе місце займає вольтамперометрія, яка поєднує високу чутливість і швидкість аналізу, дозволяючи одночасно визначати декілька металів у малих концентраціях.

Тонкошарова хроматографія (ТСХ) характеризується простотою обладнання та

доступністю, проте потребує значного часу аналізу. Вона застосовується не лише для важких металів, а й для пестицидів, органічних сполук, нафтопродуктів.

Атомно-емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою (АЕС-ІЗП) вирізняється високою точністю, чутливістю та широким діапазоном визначення елементів. Метод ефективний для контролю промислових викидів, дослідження ґрунтів, повітря та води, але потребує дорогого обладнання.

Мас-спектрометрія залишається одним із найрезультативніших методів, особливо у поєднанні з газовою або рідинною хроматографією. Вона використовується для ізотопного та елементного аналізу, а також для виявлення слідів забрудників у природних і техногенних зразках.

Атомно-абсорбційна спектроскопія (ААС) — один із найпоширеніших методів аналізу водних об'єктів, який забезпечує високу точність визначення таких металів, як Cd, Hg, Pb, Ni та інших. Методика входить до стандартів визначення важких металів у природних і стічних водах.

Фотоколориметрія та спектрофотометрія використовуються для візуального або фотоелектричного визначення інтенсивності забарвлення розчинів. Сучасні портативні фотоколориметри забезпечують експрес-аналіз у польових умовах, а модифікації спектрофотометрії дозволяють досліджувати широкий спектр органічних та неорганічних сполук.

Твердофазна спектрофотометрія (ТФС) поєднує сорбційне концентрування та фотометричний аналіз сорбентів, що забезпечує високу чутливість і низький межовий рівень виявлення. Її застосовують для визначення Cu, Pb, Zn, Fe, Cd, Hg у водах, харчових продуктах та ґрунтах.

Загалом, поєднання сорбційних технологій із спектральними та фотометричними методами дозволяє підвищити чутливість, скоротити час аналізу та розширити можливості ідентифікації металів у складних матрицях [5].

IV. Висновки

Проведений аналітичний огляд сучасних методів визначення важких металів у водному середовищі показав, що розвиток інструментальних технологій аналізу спрямований на підвищення точності, селективності та чутливості визначення, а також на зменшення часу проведення аналізу й спрощення пробопідготовки.

Сорбційні методи залишаються одним із найперспективніших напрямів аналітичної хімії завдяки своїй універсальності, простоті виконання та можливості поєднання з іншими інструментальними підходами — атомно-абсорбційною спектроскопією, спектрофотометрією, вольтамперометрією тощо. Використання модифікованих органічних і неорганічних сорбентів дозволяє підвищити селективність вилучення металів і точність кількісного визначення.

Атомно-емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою та мас-спектрометрія демонструють надзвичайно низькі межі виявлення та широкий аналітичний діапазон, проте вимагають значних матеріальних витрат і високої кваліфікації персоналу. Вольтамперометрія, натомість, забезпечує експресність, багатокомпонентність аналізу та можливість використання в польових умовах. Методи фотометрії й спектрофотометрії, особливо в твердофазному виконанні, зберігають значення як доступні, відтворювані й наочні інструменти для оперативного екологічного контролю.

Розвиток аналітичної бази екологічного моніторингу сьогодні орієнтований на створення портативних, автоматизованих систем аналізу, здатних виконувати вимірювання безпосередньо у польових умовах із високою точністю та мінімальною участю оператора. Важливим напрямом подальших досліджень є синтез нових високоефективних сорбентів із прогнозованими властивостями, розроблення комбінованих методик, що інтегрують сорбційне концентрування з оптичними або електрохімічними методами детектування.

Отже, систематизація та вдосконалення сучасних методів визначення важких металів у водному середовищі є необхідною умовою підвищення ефективності моніторингу стану довкілля, забезпечення достовірності результатів аналізу та формування науково обґрунтованих заходів щодо охорони водних ресурсів.

Література

[1] Полюхович, Сергій & Сафоник, Андрій & Грицюк, Володимир. (2024). Ідентифікація домішкових компонент у процесі магнітного фільтрування рідких середовищ. Modeling, Control and Information Technologies. 314-317. 10.31713/MCIT.2024.098.

[2] Lastovetskyi, Dmytro & Сафоник, Андрій & Полюхович, Сергій. (2023). Інноваційні підходи до керування та моніторингу систем біологічного очищення стічних вод. Modeling Control and Information Technologies. 218-220. 10.31713/MCIT.2023.067.

[3] Кичкирук, О & Кусяк, Н & Яновська, Е. (2022). Сорбційно-рентгенофлуоресцентне визначення мікрокількостей деяких токсичних металів у природних об'єктах після їх попереднього концентрування на модифікованому силікагелі. Ukrainian Journal of Natural Sciences. 155-166. 10.32782/naturaljournal.1.2023.155-166.

[4] Дзюба, Ганна & Гагаріна, Леся. (2021). Дослідження сорбційних та кінетичних властивостей сорбентів на основі оксигідротованих іонів цирконію, алюмінію, заліза, марганцю для очищення питної води. Матеріали міжнародної науково-практичеої конференції Екологія Людина Суспільство. 157-160. 10.20535/EHS.2021.232870.

[5] Н.О. Тітова, Ю.В. Бойчук, "Сорбційно-аналітичні методи визначення токсичних металів у природних водах," Аналітика і контроль, т. 23, №1, с. 11–18, 2019.

[6] Деменюк, О & Шульга, С & Бабич, І. (2023). Застосування залізовмісних коагулянтів для очищення річкової води у холодну пору року. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 200-207. 10.32782/tnv-tech.2023.4.25..

[7] Дудатьєв, І & Притула, М & Озменчук, І. (2025). Інформаційно вимірювальна система визначення концентрації домішок у воді на основі кондуктометричного сенсора. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 69-75. 10.32782/tnv-tech.2025.

Розробка системи регулювання струму в електрокоагуляційній установці

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.122

Андрій Сафоник
Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Іван Таргоній
Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
i.m.tarhonii@nuwm.edu.ua

Наталія Ковальчук
Національний університет водного господарства
та природокористування
Рівне, Україна
n.s.kovalchuk@nuwm.edu.ua

***Анотація* — розроблено систему автоматичного регулювання струму в електрокоагуляційній установці для очищення стічних вод. Запропонована система забезпечує стабільність електричних параметрів процесу, що дає змогу підтримувати оптимальні умови коагуляції незалежно від зміни провідності або складу водного середовища. Наведено опис електричної схеми, склад шафи автоматизації та принцип роботи системи керування.**

Ключові слова — *автоматизація, регулювання струму, електрокоагуляція, стічні води, напруга.*

I. Вступ

Одним із актуальних напрямів дослідження є вдосконалення технологій очищення стічних вод [1-4]. Серед ефективних методів видалення домішок особливе місце займає електрокоагуляція, що ґрунтується на утворенні коагулянтів у результаті електрохімічних процесів. Проте стабільність роботи електрокоагуляційних установок значною мірою залежить від точності регулювання електричних параметрів, зокрема сили струму, яка визначає швидкість утворення іонів заліза.

Розробка системи автоматичного регулювання струму дозволяє забезпечити оптимальний режим роботи установки, підвищити ефективність очищення води та зменшити витрати електроенергії. Це створює передумови для впровадження енергоощадних і надійних технологій у водоочисних комплексах промислового та комунального призначення.

Саме тому в даній роботі розглянуто систему очищення стічних вод методом електрокоагуляції. Метою даної роботи є розробка та дослідження системи регулювання струму в електрокоагуляційній установці, яка забезпечує стабільність технологічного процесу та підвищення якості очищення стічних вод.

II. Постановка задачі

Для забезпечення стабільної та ефективної роботи електрокоагуляційної установки необхідно підтримувати силу струму в робочому діапазоні, який відповідає оптимальним умовам коагуляції. У процесі експлуатації параметри водного середовища, температура, а також стан електродів можуть змінюватися, що призводить до коливань струму та зниження якості очищення.

III. Вирішення поставленої задачі

Для автоматизації процесу очищення стічних вод розроблено електричну схему електрокоагуляційної установки, що представлена на рис. 1.

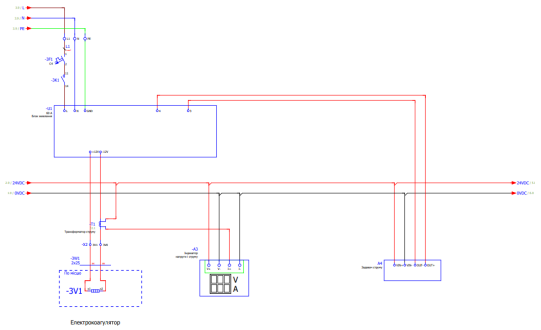


Рис. 1. Електрична схема для регулювання сили струму електрокоагулятора

Також розроблено шафу автоматизації, яка складається з: програмованого реле Акутек ПР200-24.2.1.0; блока живлення на 60 А Mean Well RSP-1000-12; індикатор вольтметра – амперметра 100А KETOTEK із шунтом; задаючого пристрою XY5008E, датчика струму CHK200EKBDA24S4, а також додаткових елементів(клеми, автоматичні вимикачі, реле магнітні пускачі, перемикачі, кнопки, лампи індикації, запобіжники, реле струму і т.д.) для автоматизації роботи електрокоагуляційної

установки. Внутрішній вигляд шафи автоматизації представлено на рис. 2.



Рис. 2. Внутрішній вигляд щита автоматизації



Рис. 3. Зовнішній вигляд щита автоматизації

Детально дослідження впливу сили струму на ефективність очищення стічних вод процесів очищення рідин розглянуто в [3, 4]. Проте в реальних системах струм між пластинами електрокоагулятора є змінним і коливається в широких межах в залежності від наявності забруднень у стічних вод. Тому доцільним є розробка системи автоматичного регулювання сили струму для забезпечення заданої кількості коагулянту.

Система контуру регулювання струму працює наступним чином:

1. На передній панелі шафи автоматизації розміщено задаючий пристрій задаючого пристрою XY5008E, яким виставляється сила струму між пластинами електрокоагулятора. Вихідним сигналом даного пристрою є напруга 0…5 VDC, що під'єднано до аналогового входу AI1 програмованого реле.
2. Програмоване реле обробляє даний сигнал та масштабує відповідно величини завдання струму 0…60 А постійної напруги. Отримане значення порівнюється з реальним струмом, що вимірюється датчиком струму CHK200EKBDA24S4. Обробляється відповідно до заданої програми і сигнал розузгодження передається через аналоговий вихід AO1 на блок живлення Mean Well RSP-1000-12 сигналом постійної напруги 0…5 VDC.
3. Блок живлення Mean Well RSP-1000-12 регулює вихідну напругу в межах 40~110% від номінальної напруги 12 VDC в залежності від зовнішньої напруги Vci(надходить від програмованого реле).
4. Між пластинами електрокоагулятора починає протікати струм прямо пропорційний величині вихідної напруги з блока живлення і обернено пропорційний провідності середовища. Відповідно починається електрохімічний процес вироблення коагулянту і очистки стічних.
5. Для реагування на зміну провідності води використовується датчик струму, який підєднано до аналогового входу AI3 програмованого реле і передає сигнал 4…20 mA пропорційно до струму 0…200 А.
6. Також на передній панелі електрокоагулятора розміщено індикатор вольтметра – амперметра KETOTEK із шунтом для відображення реального струму на напруги на електрокоагуляторі.

Висновки

Розроблено систему автоматичного регулювання струму для електрокоагуляційної установки, яка забезпечує стабільну роботу процесу очищення стічних вод. Запропоноване технічне рішення дозволяє підтримувати задану силу струму незалежно від зміни параметрів водного середовища, підвищує ефективність коагуляції та зменшує енергоспоживання.

References

[1] Safonyk A. Research and automation of the process of wastewater treatment electrocoagulation / Andrii Safonyk, Ivan Targoniy, Martyniuk Yuriy, Andrii Bomba // Computer Science and Information Technologies: Proceedings of the XIII International Scientific and technical Conference CSIT 2018. Volume 1. - Львів: Видавництво "Вежа і Ко", 2018. - Pp. 84-88.

[2] Сафоник А.П. Розроблення імітаційної моделі процесу електрокоагуляції / Сафоник А. П., Таргоній І. М. // Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій: Матеріали Міжнародної наукової конференції. – Рівне, 2018. – С. 212-213.

[3] Safonyk A., Bomba A., Tarhonii I. (2019) Modeling and automation of the electrocoagulation process in water treatment // Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 871, pp 451-463.

[4] Safonyk, A., Tarhonii, I., Rudyk, A., Hrytsiuk, I. Modeling, analysis and automation of wastewater treatment by electrocoagulation method. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, 1246 AISC, pp. 597–611.

Розробка прототипу польотного контролера на базі мікроконтролера ESP32

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.123

Семенко Богдан-Роман
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
semenko_vg24@nuwm.edu.ua

Андрій Христюк
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
a.o.khrystyuk@nuwm.edu.ua

Ігор Мельник
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
i.i.melnyk@nuwm.edu.ua

Анотація — **В роботі проведено аналіз ринку сучасних польотних контролерів, а також досліджено можливості використання мікроконтролера ESP32 для побудови власної системи управління безпілотним літальним апаратом. Розроблено принципову електронну схему, яка включає основні сенсори (GPS, барометр, магнітометр, акселерометр), виконавчі механізми (серводвигуни, електродвигун) та модулі зв'язку (Wi-Fi, радіоканал). Для програмного забезпечення використано FreeRTOS, що дозволило організувати багатозадачність: одночасну обробку даних датчиків, стабілізацію польоту, роботу веб-сервера та радіозв'язку з пультом**

Ключові слова — БПЛА; мікроконтролер; керування; FreeRTOS; STM32; польотний контролер

I. АКТУАЛЬНІСТЬ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний світ переживає технологічну революцію, одним із ключових каталізаторів якої стали безпілотні літальні апарати (БПЛА). За останнє десятиліття дрони еволюціонували від нішевих пристроїв для ентузіастів до незамінних інструментів у цивільних та військових галузях. Глобальний ринок БПЛА демонструє стрімке зростання, яке, за прогнозами аналітиків, продовжиться й у 2026 році, перетворюючи цілі сектори економіки та докорінно змінюючи підходи до ведення бізнесу, моніторингу та безпеки. Особливої актуальності розвиток та виробництво безпілотних систем набули в Україні, де вони стали критично важливим елементом як для оборони країни, так і для майбутньої відбудови та модернізації економіки.

II. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою є розробка та тестування прототипу польотного контролера на базі мікроконтролера ESP32. Для досягнення мети поставлено такі завдання: (1) провести аналіз ринку сучасних польотних контролерів для БПЛА; (2) визначити ключові технічні вимоги до польотного контролера; (3) спроектувати апаратну частину контролера на базі ESP32 та необхідних сенсорів; (4) розробити або адаптувати програмне забезпечення для стабілізації та управління польотом.

III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Для успішної розробки конкурентоспроможного вітчизняного польотного контролера (ПК) було проведено аналіз поточного ринку. Дослідження охоплювало вивчення домінуючих технологічних платформ, ключових виробників, функціональних можливостей популярних моделей та їх цінової політики станом на 2025 рік. Цей аналіз дозволив чітко визначити незайняті ринкові ніші та сформулювати технічні вимоги до прототипу. Ринок польотних контролерів умовно поділяється на кілька ключових сегментів, що відрізняються апаратною базою, програмним забезпеченням та сферою застосування (контролери на базі мікроконтролерів STM32; контролери екосистеми Pixhawk; DJI та інші закриті (пропрієтарні) системи). В умовах повномасштабної війни в Україні з'явилася низка вітчизняних виробників, які розробляють власні контролери, наприклад, VYRIY або контролери, представлені на платформі Brave1. Це свідчить про високий попит та намагання зменшити залежність від іноземних постачальників, хоча поки що вони не займають домінуючої частки ринку. Проведений аналіз ринку польотних контролерів для БПЛА дозволяє зробити кілька ключових висновків. Сучасний ринок пропонує широкий вибір технологічно довершених та потужних рішень, переважно на базі архітектури STM32 та стандарту Pixhawk. Ці контролери забезпечують високу надійність та величезний функціонал, що задовольняє потреби професійних та вимогливих хобійних застосувань.

Однак, зворотним боком цієї технологічної складності є висока вартість кінцевих пристроїв, що стає суттєвим обмежувальним фактором для масового виробництва, особливо в умовах обмеженого бюджету. Для значної кількості практичних завдань — таких як прості FPV-дрони, апарати для навчання пілотів, базового моніторингу чи виконання спеціалізованих функцій — функціонал топових контролерів є надлишковим, а їхня ціна — економічно невиправданою. Таким чином, стає очевидним існування чітко окресленої ринкової ніші для бюджетних, але достатньо функціональних польотних контролерів. Існує гострий попит на рішення, які б пропонували необхідний мінімум для стабільного та керованого польоту, але при цьому мали б значно нижчу собівартість та були б розроблені на доступній елементній базі. Саме цю нішу і покликана зайняти розробка вітчизняного польотного контролера на базі мікроконтролера ESP32, який може стати економічно обґрунтованою та конкурентоспроможною альтернативою існуючим на ринку дорогим рішенням.

Проведене дослідження підтвердило гіпотезу про те, що розробка польотного контролера на альтернативній, дешевшій платформі, такій як ESP32, є виправданою та має значний ринковий потенціал. Головною вимогою до апаратної реалізації польотного контролера ставилась наявність на платі ESP32 достатньої кількості вільних GPIO-пінів, які можуть бути сконфігуровані як 6 PWM-виходів, один UART (Tx/Rx) та один SPI-інтерфейс, на додачу до стандартних пінів I2C. В результаті розроблено схему реалізації поставлених задач (рис.1.).

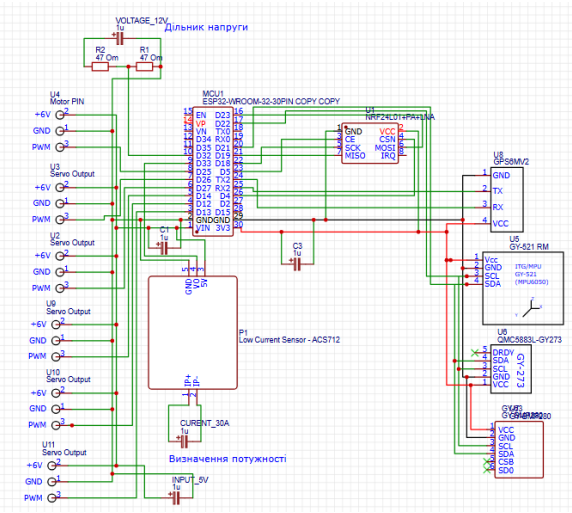


Рис. 1 Принципова електронна схема розробленого прототипу

Розроблений прототип містить: мікроконтролер MCU1 - ESP32-WROOM-32-30PIN, систему живлення та моніторингу; комплекс сенсорів для автономної навігації; канал зв'язку та керування; виконавчі механізми.

Також розроблено та реалізовано друковану плату пристрою (Рис.2.).

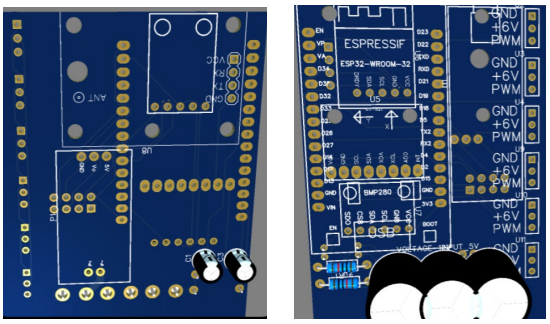


Рис. 2. Вигляд двосторонньої друкованої плати прототипу польотного контролера

Розроблена плата чітко розділена на функціональні зони: логічну/обчислювальну в центрі, силову/вихідну справа та навігаційну зверху. Це класичний підхід у проєктуванні електроніки, який допомагає мінімізувати перешкоди. Вона демонструє розуміння принципів проєктування електроніки для БПЛА, зокрема в частині компактного розміщення компонентів, фільтрації живлення та чіткого функціонального зонування.

Для програмного забезпечення використано FreeRTOS, що дозволило організувати багатозадачність: одночасну обробку даних датчиків, стабілізацію польоту, роботу веб-сервера та радіозв’язку з пультом Це програмне забезпечення - складна, багатозадачна система, розроблена для керування дроном. Воно поєднує в собі кілька ключових функцій, що працюють паралельно завдяки операційній системі FreeRTOS : (1) збір даних з датчиків(система постійно зчитує дані з GPS, барометра, IMU та компаса, щоб знати своє місцезнаходження, орієнтацію та висоту); (2) зв'язок (Wi-Fi: створює власну точку доступу, що дозволяє будь-якому пристрою (смартфону, ноутбуку) підключитися, отримати доступ до веб-інтерфейсу і змінити параметри місії; радіозв'язок (nRF24): приймає команди з пульта (ручний режим) і надсилає назад телеметрію (поточний статус, висоту, координати) для відображення на пульті; (3) автономне керування (автопілот): програмне забезпечення використовує алгоритми ПІД-регулювання та геодезичні розрахунки, щоб автоматично підтримувати задану висоту, орієнтувати до цільових координат, виконувати складні послідовності дій, як-от зниження, скидання вантажу, набір висоти і повернення; (4) керування виконавчими механізмами: на основі поточного режиму та даних з датчиків, ПЗ керує сервоприводами, що контролюють кермо висоти, кермо напряму, а також двигун і механізм скидання вантажу.

В програмному забезпеченні для проведення досліджень передбачено два розділи: статус системи та польотне завдання (рис.3.).

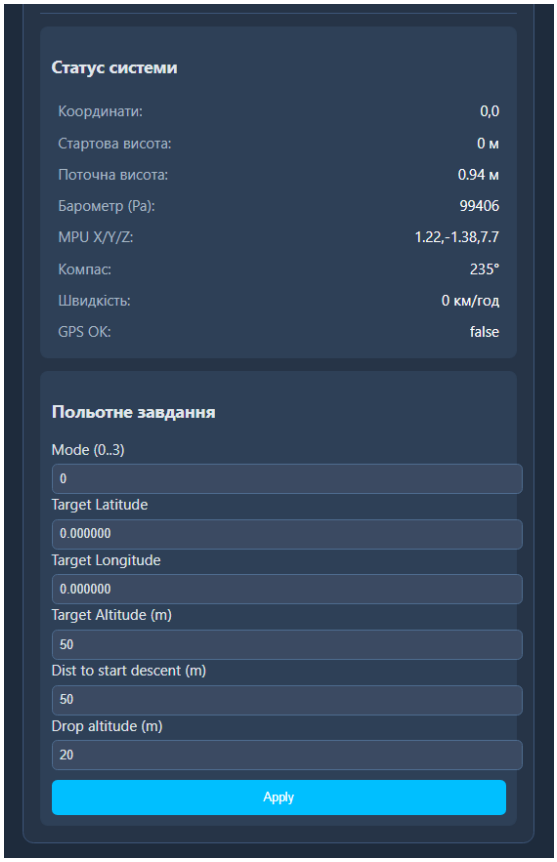


Рис. 3 Вигляд вікна налаштувань

Статус системи призначений для відображення телеметрії в реальному часі з датчиків літального апарата. Він надає пілоту або оператору критично важливі дані про поточний стан дрона:

- Координати: показує широту та довготу, отримані з GPS.
- Стартова висота: вказує висоту, на якій був запущений дрон. Це може бути використано як опорна точка для розрахунку відносної висоти.
- Поточна висота: показує поточну висоту літака над стартовою точкою, виміряну барометром.
- Барометр (Pa): відображає абсолютний атмосферний тиск. Зміни тиску використовуються для розрахунку висоти.
- MPU X/Y/Z: дані з інерційного вимірювального блоку (IMU), такого як MPU-6050. Ці значення (прискорення або кутова швидкість по трьох осях) використовуються для стабілізації та орієнтації літака.
- Компас: показує курс літака відносно магнітної півночі.
- Швидкість: визначається за даними GPS.
- GPS OK: логічний індикатор, який повідомляє, чи є дійсний сигнал GPS.

Польотне завдання є панеллю керування, що дозволяє оператору віддалено налаштовувати параметри автономної місії:

- Mode (0..3): Вибір режиму польоту.
  - 0: idle (очікування)
  - 1: nav (навігація до цільових координат)
  - 2: auto drop+return (автоматичне скидання вантажу і повернення)
  - 3: manual (ручне керування)
- Target Latitude/Longitude: Цільові GPS-координати, до яких повинен летіти дрон в автономному режимі.
- Target Altitude (m): Цільова висота для автономного польоту.
- Dist to start descent (m): Відстань від цілі, на якій дрон повинен розпочати зниження для скидання вантажу.
- Drop altitude (m): Висота, на якій має відбутися скидання вантажу.
- Apply: кнопка для застосування всіх встановлених параметрів і відправки їх на борт дрона.

Таким чином, ця система є повноцінною платформою для керування дроном, яка поєднує в собі ручний контроль, автономні можливості та зручний веб-інтерфейс для налаштування місій.

IV. ВИСНОВКИ

В роботі було проведено аналіз ринку сучасних польотних контролерів, а також досліджено можливості використання мікроконтролера ESP32 для побудови власної системи управління безпілотним літальним апаратом.

У ході роботи розроблено принципову електронну схему, яка включає основні сенсори, виконавчі механізми та модулі зв'язку. Для програмного забезпечення використано FreeRTOS, що дозволило організувати багатозадачність: одночасну обробку даних датчиків, стабілізацію польоту, роботу веб-сервера та радіозв'язку з пультом.

Також реалізовано веб-інтерфейс для моніторингу стану літака та введення параметрів польоту. Передбачено кілька режимів роботи: ручне керування, автоматичний політ за координатами та режим доставки вантажу.

Отримані результати підтверджують, що навіть на базі відносно доступної апаратної платформи можливо створити функціональний контролер з гнучким програмним забезпеченням.

ЛАТЕРАТУРА

[1] Austin, R. Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment. Wiley, 2010.

[2] Mellinger, D., Michael, N., & Kumar, V. Trajectory Generation and Control for Precise Aggressive Maneuvers with Quadrotors. The International Journal of Robotics Research, 31(5), 2012.

[3] Kilby T., Kilby B. Getting Started with Drones. USA : Make Community, LLC, 2015. 204 p.

[4] Understanding ESCs for FPV Drones [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://oscarliang.com/esc.

[5] Tang, L., Wang, H., Li, P., & Wang, Y. Real-time Trajectory Generation for Quadrotors using B-spline based Non-uniform Kinodynamic Search. arXiv:1904.12348, 2019.

Розробка адресної оптопари як ефективного рішення для масштабування систем керування

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.124

Семенко Богдан-Роман
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
semenko_vg24@nuwm.edu.ua

Андрій Христюк
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
a.o.khrystyuk@nuwm.edu.ua

Олена Присяжнюк
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
o.v.prysiazhniuk@nuwm.edu.ua

Анотація — **В роботі проведено аналіз існуючих методів масштабування систем керування на базі мікроконтролерів та виявлено їхні суттєві недоліки, зокрема високу вартість, складність розводки плат та дефіцит пінів GPIO. Запропоновано нове рішення — "Адресна Оптопара" (патент України №160500), що поєднує в собі принцип роботи адресних світлодіодів та оптичну розв'язку. Розроблено та описано принципову будову компонента, який дозволяє керувати практично необмеженою кількістю виконавчих механізмів, використовуючи лише один цифровий пін контролера. На відміну від традиційних мультиплексорів, запропоноване рішення надає можливість не лише бінарної комутації, але й плавного аналогового керування навантаженням шляхом модуляції кольору випромінювача.**

Ключові слова — оптопара; адресний світлодіод; мультиплексор; ESP32; керування.

I. АКТУАЛЬНІСТЬ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні системи автоматизації, Інтернету речей (IoT) та "розумного будинку" вимагають одночасного керування дедалі більшою кількістю виконавчих пристроїв. Водночас, ключові елементи цих систем — мікроконтролери — мають фізичні обмеження. Навіть потужні плати, як-от Arduino Mega, хоч і пропонують до 70 пінів вводу/виводу, є громіздкими та дорогими. Більш сучасні та популярні рішення, як-от ESP32, мають значно меншу кількість вільних пінів (близько 25-27), що стає критичною проблемою при проєктуванні складних систем.

Традиційним рішенням цієї проблеми є використання мультиплексорів (наприклад, CD4067) або розширювачів портів (shift registers). Однак цей підхід має суттєві недоліки: для керування 16 каналами мультиплексор вимагає 5-6 дефіцитних пінів контролера, а для 32 каналів — вже 8. Це значно ускладнює розводку друкованих плат, збільшує їхній розмір та кінцеву вартість виробу. Таким чином, існує гострий попит на нове, більш ефективне та гнучке рішення для масштабування систем керування..

II. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою є розробка та опис нового схемотехнічного рішення — адресної оптопари, що дозволяє вирішити проблему дефіциту пінів мікроконтролерів. Для досягнення мети поставлено такі завдання: (1) провести порівняльний аналіз існуючих методів розширення кількості керованих каналів; (2) розробити принципову будову нового компонента на базі доступної елементної бази; (3) описати принцип роботи запропонованого пристрою та його ключові переваги; (4) продемонструвати унікальні можливості компонента, недоступні традиційним аналогам (зокрема, аналогове керування).

III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Для вирішення поставленої задачі було розроблено та запатентовано (Патент України на корисну модель №160500) новий компонент — "Адресна Оптопара". На відміну від стандартної оптопари, де використовується простий світлодіод, запропоноване рішення базується на поєднанні двох ключових елементів: світлодіодний випромінювач з індивідуальною адресацією (наприклад, WS2812B

або аналог) та фотоприймач у вигляді фоторезистора.

Традиційна оптопара, як показано на (Рис. 1), складається зі світлодіода (LED) та фотоприймача (наприклад, фоторезистора). Її головним недоліком є необхідність виділення окремого піна контролера для керування кожним таким компонентом.

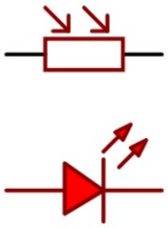


Рис. 1. Схемотехнічне зображення компонентів стандартної оптопари (світлодіод та фоторезистор)

Запропоноване рішення (Рис. 2) модернізує цей підхід, замінюючи простий світлодіод на інтелектуальний адресний випромінювач (наприклад, WS2812B). Цей випромінювач має інтегровану логіку з виводами живлення (VDD, VSS), входом даних (DIN) та виходом даних (DOUT).

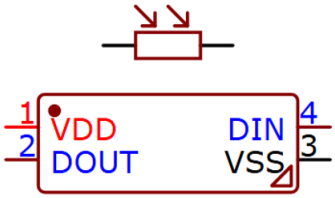


Рис. 2. Схемотехнічне зображення запропонованої адресної оптопари

Обидва елементи розташовані в одному корпусі та оптично зв'язані (Рис. 3). Принцип роботи полягає в наступному: контролер (наприклад, ESP32) підключається до входу DIN першого компонента. Далі компоненти з'єднуються послідовно (DOUT одного до DIN наступного), утворюючи просту трипровідну шину (живлення, земля, дані). Це дозволяє, використовуючи лише один цифровий пін контролера, передати унікальну команду (що містить параметри кольору та яскравості) на будь-який із тисяч компонентів у ланцюгу.

Ключові переваги розробки: (1) радикальна економія пінів. Керування будь-якою кількістю пристроїв (16, 100 чи 1000) здійснюється лише одним піном; (2) спрощення розводки плати: замість "павутини" дротів від мультиплексора використовується проста послідовна шина; (3) аналогове керування: це унікальна перевага, оскільки фоторезистор має різну спектральну чутливість, а адресний світлодіод є RGB-пристроєм, з'являється можливість керувати опором на виході оптопари, надсилаючи різні колірні коди. Це дозволяє плавно регулювати навантаження, а не лише вмикати/вимикати його, як це робить мультиплексор.

На (Рис. 3) та (Рис. 4) детально зображено принципову будову розробленої адресної оптопари. Компонент складається з наступних елементів: корпус (11), в якому розташовані: адресний світлодіод WS2812b (3); фоторезистор (1), що розміщений над світлодіодом; область оптичного контакту (10), яка може містити світлофільтр для забезпечення ефективної оптичної взаємодії.

Для інтеграції в електричну плату пристрій має такі виводи:к онтакти живлення світлодіода: «+» (VCC) (4) та «-» (GND) (8). Контакти даних світлодіода: цифровий вхідний (DIN) (7) та цифровий вихідний (DOUT) (5) для послідовного з'єднання. Контакти фоторезистора (2, 6, 9): виводяться за корпус для зчитування аналогового сигналу (опору).

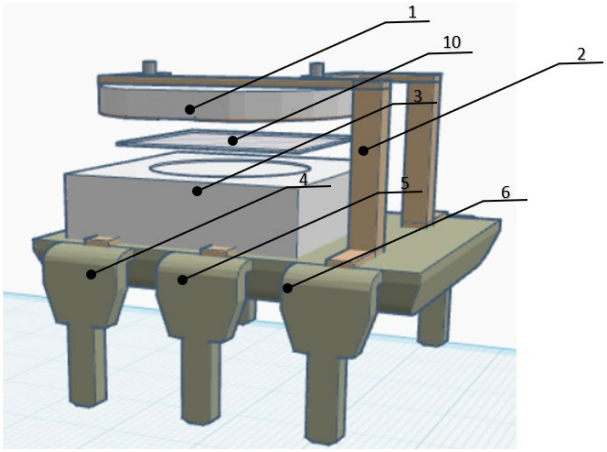


Рис. 3 Принципова будова адресної оптопари (вигляд 1)

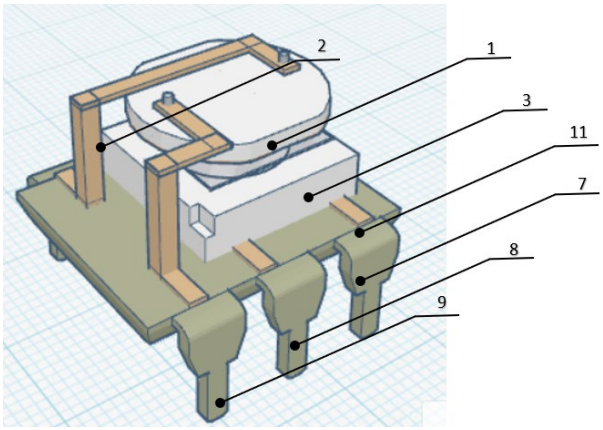


Рис. 4 Принципова будова адресної оптопари (вигляд 2)

Така будова дозволяє реалізувати принципово нову архітектуру системи, показану на (Рис. 5). Контролер підключається до DIN першого компонента. Далі компоненти з'єднуються послідовно (DOUT одного до DIN наступного), утворюючи просту трипровідну шину (Живлення, Земля, Дані).

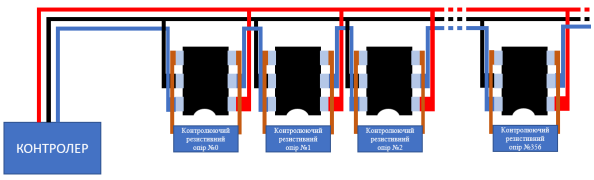


Рис. 5. Архітектура підключення адресних оптопар до контролера (масштабування)

Для підтвердження промислової придатності та практичної реалізації розробленої технології було спроєктовано та виготовлено прототип кінцевого

пристрою — модуль керування "BRV ACS Lite". Цей пристрій є повноцінним апаратно-програмним комплексом.

Апаратна частина пристрою (Рис. 6) являє собою спеціально розроблену друковану плату на базі мікроконтролера ESP32. Плата містить всю необхідну схемотехнічну обв'язку, роз'єми живлення (IN+, IN-), USB-порт для програмування та моніторингу, а також виходи для підключення виконавчих механізмів, які керуються через шину адресних оптопар.

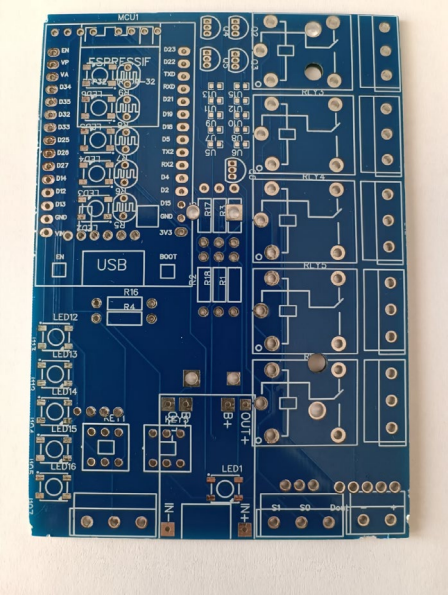


Рис. 6. Друкована плата прототипу "BRV ACS Lite" на базі ESP32

Цей пристрій є компактним модулем (наприклад, для керування 50 релейними каналами), який повною мірою використовує переваги описаної технології. Завдяки застосуванню адресних оптопар, весь модуль підключається до будь-якого керуючого мікроконтролера (наприклад, ESP32) через єдиний сигнальний пін, що радикально спрощує інтеграцію та масштабування систем автоматизації.

Програмна частина комплексу реалізована у вигляді повноцінного веб-інтерфейсу "BRV ACS Lite" (Рис. 7), що працює безпосередньо на мікроконтролері. Він надає користувачу повний доступ до моніторингу стану пристрою (заряд АКБ, поточна IP-адреса) та гнучкого налаштування системи. Це включає конфігурацію мережі Wi-Fi, індивідуальні параметри для кожного реле (наприклад, назва, принцип дії), а також створення складних логічних тригерів, що спрацьовують за часом, датою або іншими подіями.

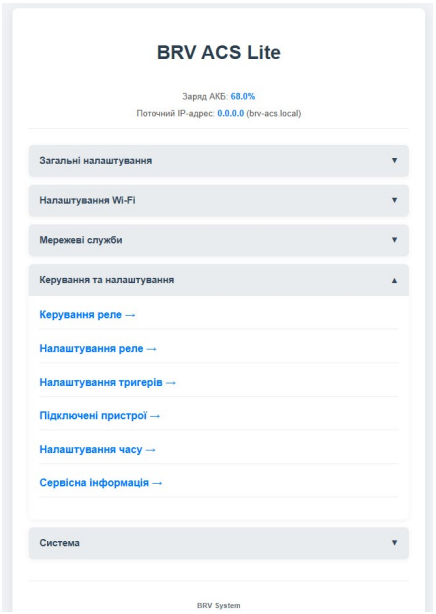


Рис. 7. Головний веб-інтерфейс керування пристроєм "BRV ACS Lite"

Ключовою особливістю системи, яка стала можливою завдяки застосуванню технології адресних оптопар, є можливість масового керування навантаженнями. Веб-інтерфейс дозволяє керувати десятками окремих реле, відображаючи їхній поточний стан (Рис. 8), при тому що сам модуль керує ними через єдиний сигнальний пін.

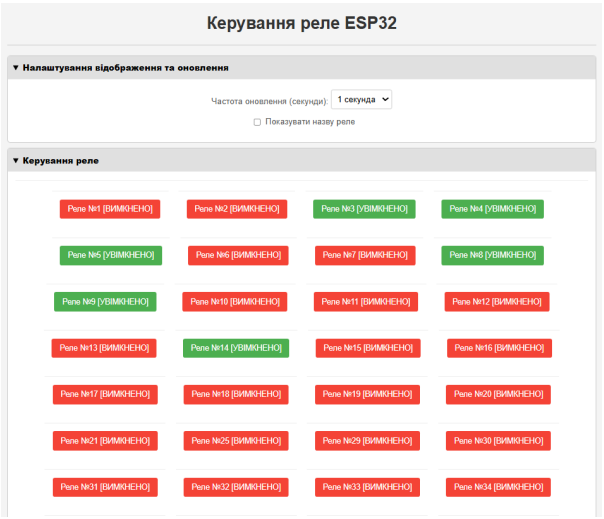


Рис. 8. Інтерфейс керування та моніторингу стану 34 реле

Окрім веб-інтерфейсу, система інтегрована з хмарними сервісами, зокрема з Telegram-ботом (Рис. 9). Це дозволяє не лише дистанційно керувати реле за допомогою текстових команд (наприклад, /toggle_1) та отримувати зворотний зв'язок про стан, але й отримувати миттєві сповіщення про спрацювання тригерів (наприклад, за показами температури). Це підтверджує високий рівень автоматизації та гнучкість розробленого рішення.

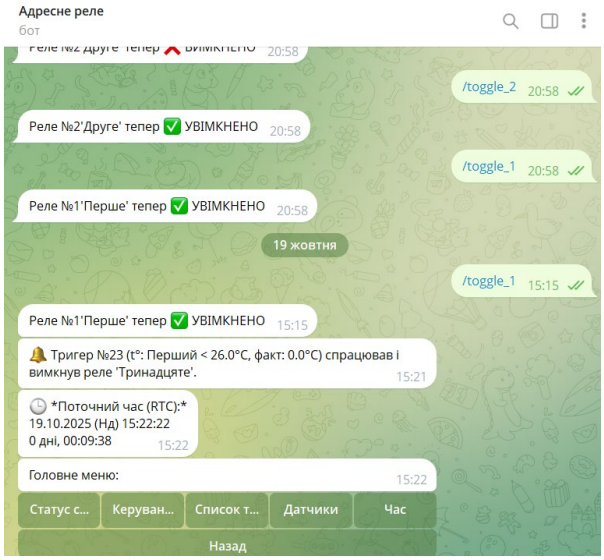


Рис. 9. Інтеграція пристрою з Telegram-ботом для керування та сповіщень

IV. ВИСНОВКИ

У ході роботи було розроблено, описано та запатентовано (Патент України №160500) інноваційний компонент — "Адресну Оптопару". Проведений аналіз довів, що дане рішення має значні технічні та економічні переваги над традиційними мультиплексорами, вирішуючи проблему дефіциту пінів мікроконтролерів та додаючи унікальну функцію аналогового керування шляхом модуляції кольору.

Для підтвердження практичної цінності та промислової придатності технології, на її основі було розроблено повноцінний апаратно-програмний комплекс — модуль керування "BRV ACS Lite". Це включало проєктування та виготовлення кастомної друкованої плати, а також розробку гнучкого програмного забезпечення з багатофункціональним веб-інтерфейсом та інтеграцією з Telegram-ботом для дистанційного керування.

Таким чином, робота демонструє повний цикл розробки: від інноваційної схемотехнічної ідеї до готового, масштабованого та комерційно придатного продукту для сучасних систем автоматизації, Інтернету речей та "розумного будинку".

ЛАТЕРАТУРА

[1] Worldsemi. WS2812B Intelligent control LED integrated light source. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mouser.com/pdfDocs/WS2812BEN1-2.pdf.

[2] Texas Instruments. CD74HC4067 High-Speed CMOS Logic 16-Channel Analog Multiplexer. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4067.pdf.

[3] Maximizing Microcontroller GPIO Pin Utilization. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.allpcb.com/allelectrohub/maximizing-microcontroller-gpio-pin-utilization.

[4] Семенко Б-Р.В. Патент України на корисну модель № 160500. ОПТОПАРА. Зареєстровано 10.09.2025, Бюл. № 37.

Вимірювання та контроль параметрів pH та Eh при очищенні води

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.125

Леонід Филипчук
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
l.v.fylypchuk@nuwm.edu.ua

Максим Котик
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
kotyk.m_ak23@nuwm.edu.ua

Анотація - Досліджено існуючий стан процесів вимірювання параметрів pH та Eh при реагентному очищенні стічних вод. Досліджено залежність цих параметрів один від одного та їх вплив на даний процес. Обґрунтовано необхідність застосування систем автоматичного контролю даних параметрів для забезпечення штатного проходження технологічного процесу та запобігання негативного впливу на працівників через недопустимі відхилення даних параметрів. Запропоновано систему контролю на основі сучасних апаратних засобів. Уточнено дії щодо їх коректної роботи, правильної експлуатації та захисту в умовах високої забрудненості стічних вод.

Ключові слова - системи контролю, очищення стічних вод, автоматизація

I. Вступ

Величини pH та Eh є важливими комплексними показниками властивостей природних та стічних вод. Ці величини дозволяють оцінити окисно-відновний режим води у водоймах, забруднення її продуктами розкладу органічних речовин, стоками промислових підприємств, стан рідкої та твердої фаз на очисних спорудах.

Ці параметри впливають на самі різноманітні сторони фізико-хімічних і біохімічних процесів, що протікають при очистці води від різних забруднень. Так процеси окислення, відновлення, дисоціації, комплексоутворення потребують зміни pH та Eh, оскільки цим самим можна змінювати потенціал, напрямок та швидкість хімічних реакцій, окисно-відновну здатність речовин, міцність комплексних сполук [1-4].

Таким чином, параметри pH та Eh істотно впливають на самі різноманітні сторони фізико-хімічних процесів, що відбуваються в гетерогенних и гомогенних водних системах, регулювання яких дозволяє цілеспрямовано здійснювати процеси очистки стічних вод від різноманітних забруднень.

II. Існуючий стан та мета

Криві зміни pH та Eh мають виражений нелінійний характер, що обумовлюється логарифмічною залежністю такої зміни від дози реагенту. Окрім того, існує взаємовплив між pH і Eh [6] (зміна величини pH на одну одиницю призводить до протилежної зміни величини Eh на 58 mB та навпаки, що додатково ускладнює регулювання цих параметрів). Така складна залежність обумовлює необхідність застосування відповідних автоматичних пристроїв для дозування і контролю параметрів pH та Eh, а також надійності використання датчиків, які вимірюють значення цих параметрів, в умовах високої забрудненості стічних вод.

Мета роботи полягає в аналізі існуючих систем контролю параметрів pH та Eh та виборі найбільш надійних методів забезпечення роботи датчиків в умовах високої забрудненості природних та стічних вод.

III. Результати досліджень

З відомих способів вимірювання pH та Eh на даний час у промислових умовах використовують потенціометричний метод. Принцип його полягає в тому, що вимірюється електричний потенціал, що виникає на парі електродів, занурених в розчин. Величина потенціалу залежить від активної концентрації іонів.

При вимірюванні pH електродна пара складається з вимірювального скляного і порівнювального каломельного чи хлоросрібляного електродів. Важлива особливість скляного електрода, що вигідно відрізняє його від інших, заключається в тому, що окисно-відновні процеси, які часто протікають одночасно з контрольованими, не призводять до виникнення на ньому потенціалу. Така вибірковість дозволяє використовувати скляний електрод для вимірювання величини pH у вельми різноманітних процесах. Величина Eh вимірюється подібним чином за допомогою платинового електроду. У приладах використовують автоматичну чи ручну температурну компенсацію.

При використанні датчика з контрольним приладом необхідно провести калібрування показів вимірювання, при якому узгоджуються покази сигналу з датчика з реальним значення показника стічної води. [5-6].

Сучасні датчики характеризується покращеними показниками якості та надійності, а саме: пориста мембрана стійка до забруднення та дії

хімічних реагентів; подвійна мембрана базового електроду підвищує термін служби у ситуаціях, коли має місце підвищений вміст сульфідів (H2S) та металів, таких як олово, ртуть та срібло; новий тип твердого електроліту забезпечує базовий потенціальний контакт в умовах різних тиску і температури під час вимірювань; для точної компенсації впливу температури на процес вимірювань pH та Eh використовується температурний датчик нової капілярної конструкції Pt100, який розміщується після чутливої мембрани; механічний захист рівня IP68 захищає високоімпедансний сигнал електродів від вологи, яка може генеруватися в умовах занурення електроду (конденсації).

Для захисту датчиків від механічних пошкоджень та зменшення турбулентності потоку, створеного змішуванням стоків із реагентами, використовується захисна занурена арматура. Вона також призначена для встановлення датчиків в важкодоступні глибокі точки змішувачів-реакторів на спеціальних штангах довжиною 2-4 м.

Незалежно від типу датчика, при його постійній експлуатації всередині змішувача-реактора, де протікає процес змішування води з реагентами, його поверхня забруднюється, частково покривається шаром зважених частинок, і через це частково або повністю втрачає здатність об‘єктивно вимірювати необхідну величину параметру. Наприклад, в оборотних системах водопостачання підприємств швидкість відкладень карбонату кальцію є такою, що вони з’являються відразу після перших витків нагрівання і охолодження оборотної води.

Навіть при застосуванні систем автоматизованого дозування реагентів зниження чутливості датчиків внаслідок їх забруднення осадом зводить нанівець ефективність регулювання pH та Eh.

Для усунення даного недоліку чутливий елемент датчика необхідно очищати. У світовій практиці застосовують три основні способи очищення електродів. Перший спосіб полягає в періодичній подачі струменя води в нижню частину електроду для змиву відкладеного осаду. Однак цей спосіб практично не відновлює функціональний стан електроду при відкладенні липкого або кристалічного осаду. Другий спосіб полягає в механічному очищенні нижньої частини електроду за допомогою щіточки, що обертається. Недоліком цього способу є те що постійне тертя щіточки змінює чутливість електроду, особливо платинового. Позитивною стороною перших двох способів є те, що вони не потребують демонтажу електродної системи. Як показує досвід, найбільш дієвим є третій спосіб, який полягає у зупинці змішувача-реактора, демонтажі і витягуванні штангу з електродами, зняття електродів і відмочування їх у розчині соляної кислоти з наступною промивкою. Однак такий спосіб є достатньо трудомістким, небезпечним і неприйнятним при відсутності резервних змішувачів-реакторів або цілодобової роботи очисних споруд.

Найбільш дієвим способом відновлення чутливості є прокачка спеціальним насосом малої кількості води, яка обробляється у змішувачі-реакторі, через електроди, розміщені ззовні змішувача-реактора у спеціальній прозорій камері, наприклад, безпосередньо на корпусі змішувача (рис. 3). Це дозволяє спостерігати за станом електрода і швидко замінювати його на інший без зупинки роботи ректора-змішувача і використання громіздких штанг з подальшим відновлення чутливості знятого датчика в лабораторних умовах.

Зовнішня система контролю pH та Eh була впроваджена на ряді підприємств при очищенні стічних вод гальванічних виробництв від іонів важких металів. Тривала експлуатація такої системи показала її високу надійність та ефективність.

Висновки

Системи контролю та регулювання pH та Eh широко використовується в технології очищення води від різноманітних забруднень. Ефективність функціонування даних систем значно залежить від ступеня забруднення електродів, які вимірюють параметри, що контролюються під час очищення води.

Найбільш дієвим з точки зору відновлення чутливості забруднених електродів pH та Eh є їх зовнішнє розміщення безпосередньо на корпусі змішувача-реактора у спеціальній прозорій камері з прокачкою спеціальним насосом малої витрати стічної води, що обробляється реагентами. Така система дозволяє відмовитись від громіздких конструкцій і періодичної зупинки змішувачів-реакторів та забезпечити надійність та ефективність експлуатації датчиків та системи контролю в цілому.

Література

[1] Corbella C., Garfí M., Puigagut J. Vertical redox profiles in treatment wetlands as function of hydraulic regime and macrophytes presence / C. Corbella, M. Garfí, J. Puigagut // *Science of the Total Environment*. — 2014. Vol. 470–471. — P. 754–758

[2] Wiessner A., Kappelmeyer U., Kuschk P., Kästner M. Sulphate reduction and the removal of carbon and ammonia in a laboratory-scale constructed wetland / A. Wiessner, U. Kappelmeyer, P. Kuschk, M. Kästner // *Water Research*. — 2005. — Vol. 39, No. 19. — P. 4643–4650.

[3] Sun X., Yuan W., Jin K., Zhang Y. Control of the redox potential by microcontroller technology: researching the leaching of chalcopyrite / X. Sun, W. Yuan, K. Jin, Y. Zhang // *Minerals*. — 2021. — Vol. 11, No. 4. — Art. 382.

[4] Koch F. A., Oldham W. K. Oxidation-reduction potential — a tool for monitoring, control and optimization of biological nutrient removal systems / F. A. Koch, W. K. Oldham // *Water Science and Technology*. — 1985. — Vol. 17, No. 2–3. — P. 259–278.

[5] Филипчук В. Л. Очищення багатокомпонентних металовміщуючих стічних вод промислових підприємств / В. Л. Филипчук. – Рівне : УДУВГП, 2004. – 232 с

[6] Филипчук В.Л., Древецький В.В., Филипчук Л.В., Клепач М.І. Природоохоронні системи очищення металовмісних стічних вод та автоматизоване регулювання їх параметрів. Монографія. – Рівне : НУВГП, 2016. – 288 с.

Розробка системи місцеве/дистанційне керування дуттєвим вентилятором сушильної установки

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.126

Ольга Таргоній
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
tarhonii_vg25@nuwm.edu.ua

Іван Таргоній
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
i.m.tarhonii@nuwm.edu.ua

***Анотація* —розглянуто розробку системи аварійного керування дуттєвим вентилятором сушарки. Запропонована система дозволяє здійснювати запуск, зупинку та контроль роботи вентилятора як безпосередньо на об'єкті, так і з центрального пульта керування. Описано структуру схеми автоматизації, принцип дії та використані компоненти. Реалізовано можливість протипожежного запуску після падінь напруги.**

Ключові слова — *дуттєвий вентилятор, сушарка, місцеве керування, дистанційне керування, автоматизація.*

I. Вступ

У сучасних умовах енергетичної нестабільності, спричиненої військовою агресією Російської Федерації проти України, питання надійності та безперебійності електропостачання набуває особливої актуальності. Часті коливання та падіння напруги в електромережі призводять до збоїв у роботі промислового обладнання, зокрема сушильних установок, де важливу роль відіграє стабільна робота дуттєвих вентиляторів.

Дуттєвий вентилятор забезпечує необхідне розрідження в сушильній установці, а також для подачі вологої стружки з теплим повітрям до барабану. У разі коливань напруги або аварійних відключень виникає високий ризик виникнення пожежі, що призводить до пошкодження обладнання. Оскільки при короткочасному зникненні напруги блоки живлення виключаються і контролери перезапускаються, то проходить час для відновлення можливості керування технологічним процесом[1-3]. В таких аварійних випадках температура в сушарці продовжує рости і за лічені секунди висушений матеріал загорається. В окремих випадках, якщо загоряння відбувається в замкнених системах, то створюється достатній тиск для розриву обладнання, що є небезпечним для робочого персоналу. Тому актуальною є розробка системи керування, яка забезпечує надійне функціонування вентилятора як у місцевому, так і у дистанційному режимах, із можливістю швидкого аварійного запуску виробничого обладнання включаючи дуттєвий вентилятор.

Метою даної роботи є розробка системи місцевого та дистанційного керування дуттєвим вентилятором сушарки, що забезпечує стабільну роботу обладнання в умовах можливих коливань напруги та покращує безпеку й ефективність технологічного процесу.

II. Постановка задачі

Для ефективного керування сушильною установкою необхідно забезпечити:

1. Можливість запуску й зупинки двигуна як із місцевого пульта, так і з HMI панелі.
2. Пріоритетність місцевого керування у разі обслуговування або аварійних ситуацій.
3. Незалежність системи місцевого керування від контролера.
4. Індикацію стану вентилятора (робота, аварія, зупинка) на обох рівнях керування.
5. Захист електродвигуна від перевантаження та короткого замикання.
6. Безпечне переключення режимів керування без ризику подвійного запуску.

III. Вирішення поставленої задачі

Для вирішення поставленої задачі розроблено електричну схему місцевого та дистанційного керування дуттєвим вентилятором сушарки, що представлена на рис. 1.

Система передбачає два режими роботи:

- місцеве керування, яке здійснюється безпосередньо з пульта керування в операторській;
- дистанційне керування, що реалізується через HMI-панель, підключену до ПЛК.

Перемикання між режимами виконується за допомогою тумблера або селекторного перемикача «Місцеве/Дистанційне», при цьому

апаратна блокування виключає можливість одночасного вмикання обох режимів.

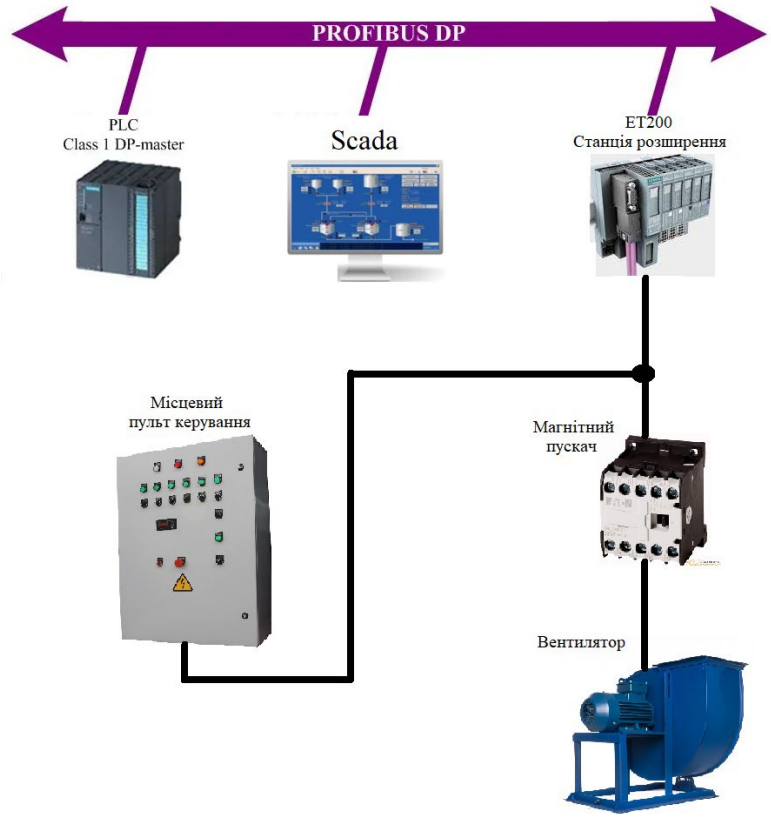


Рисунок. 1. Схема увімкнення дуттєвого вентилятора

У нормальному режимі вентилятор може працювати як у місцевому, так і в дистанційному режимі.Режим роботи задається положенням перемикача «Місцеве/Дистанційне».

1. Дистанційне керування

У дистанційному режимі всі команди надходять через ПЛК, який отримує сигнали з HMI-панелі.

- Користувач має можливість запуску, зупинки вентилятора, перегляду стану, а також діагностики аварій.
- ПЛК формує керуючі сигнали на контактори, а також контролює стан теплового реле й аварійних датчиків.
- У разі виникнення несправності ПЛК блокує подальші команди запуску й виводить повідомлення «Аварія двигуна» на екран HMI.

2. Місцеве керування

У разі вибору місцевого режиму керування всі команди з HMI-панелі блокуються, а управління двигуном здійснюється безпосередньо через місцевий пульт.

Для запуску двигуна оператор натискає кнопку «Пуск», яка замикає коло котушки контактора. Для зупинки використовується кнопка «Стоп», що розриває коло керування. Стан двигуна індикується світлодіодною зеленою лампочкою на пульті, що означає роботу виконавчого механізму

У цьому режимі система повністю незалежна від контролера, що забезпечує надійність та можливість ручного керування навіть при збоях в роботі ПЛК; відсутності зв’язку з HMI, падінні напруги в мережі.

Висновки

У роботі розроблено систему місцевого та дистанційного керування дуттєвим вентилятором сушарки, яка забезпечує надійне функціонування обладнання в умовах енергетичної нестабільності. Реалізоване рішення дозволяє здійснювати запуск і зупинку вентилятора як із місцевого пульта, так і з HMI-панелі; гарантувати незалежну роботу місцевої системи при відмові ПЛК або падінні напруги. Запропонована система сприяє підвищенню надійності, оперативності керування та безпеки технологічного процесу сушіння, що є особливо актуальним в умовах нестабільного електропостачання.

References

[1] Погребняк М. І. Автоматизація вентиляторних установок: місцевий і дистанційний контроль **:** дипломна робота. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. – 72 с.

[2] Попов В. Д**.** Автоматизація локальних вентиляційних систем з місцевим і автоматичним керуванням **:** магістерська дис. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 78 с.

[3] Блищик І. М. Система диспетчеризації і дистанційного керування інженерними системами будівель : дипломна робота. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 83 с.

СЕКЦІЯ 8

ЦИФРОВІ РІШЕННЯ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ

MCIT Modeling, control & information technologies

Potential Threats to Environmental Security of the Armed Forces under Radiation and Chemical Hazards

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.127

Ramil Akhundov
Professor at National Defence University
ORCID ID: 0009-0001-8798-8044
Baku, Azerbaijan
mr.axundov1@gmail.com

Islam Islamov
Professor at Baku Engineering University
ORCID ID: 0000-0001-8645-0640
Baku, Azerbaijan
isislamov@beu.edu.az

***Abstract* - This paper presents a structured threat evaluation framework for environmental security in military contexts, focusing on radiological and chemical hazards. It introduces a threat taxonomy that links specific sources such as reactor accidents, radiological dispersal devices, and toxic industrial chemicals to operational settings and exposure pathways. A probability–severity risk model is proposed, allowing for threshold-based decision-making aligned with established safety standards. Monitoring requirements and performance indicators including alarm delay, source localization accuracy, and forecast error are defined to ensure timely and effective response. Scenario analyses demonstrate the framework's ability to reduce decision latency, improve resource allocation, and enhance operational protection for personnel and infrastructure. The proposed model supports continuous system refinement through measurable targets, structured feedback, and integration with command decision systems.**

Keywords - military environmental security, radiological hazards, chemical threats, exposure pathways, risk model, performance metrics, contamination monitoring, command response, operational readiness, threat taxonomy.

I.Introduction

Military operations intersect with the environment in Environmental security in the armed forces addresses the prevention, detection, and mitigation of harmful releases that affect personnel, missions, and surrounding ecosystems [1-5]. Among the full spectrum of hazards, radiation and chemical threats are distinctive for their persistence, invisibility, and capacity to disrupt operations across large areas. Incidents may arise from accidents at storage or industrial facilities, loss of sealed sources, deliberate use of toxic agents, or secondary effects such as fires and resuspension. In modern theaters these risks intersect with dense urban terrain, dual-use infrastructure, and contested communications, which complicates timely assessment and response [6, 7].

This paper examines potential threats to environmental security with emphasis on radiological and chemical drivers [8, 9, 10]. The contribution is threefold: first, a concise threat taxonomy that links sources to operational settings and exposure pathways; second, a practical risk model that ties probability and severity to decision thresholds grounded in AEGL or OEL and dose limits; third, a set of monitoring and response requirements that translate the threat picture into measurable targets for sensing, data quality, forecasting, and command action. The results inform doctrine, training, and phased modernization by clarifying where to invest in sensors, analytics, and procedures in order to shorten the detect–decide–act sequence and to reduce exposure for forces and civilians.

II.Background And Related Work

Military approaches to environmental security have historically evolved from CBRN doctrine that emphasizes detection, protection, decontamination, medical support, and reconnaissance as separate lines of effort [11-15]. Civil and military standards define exposure limits for personnel and the public, while technical guides prescribe sampling, calibration, and reporting practices. Fixed posts, mobile teams, and laboratory analysis form the core of legacy monitoring. These elements are effective for localized incidents with generous timelines, yet they struggle when operations require wide area awareness, rapid risk estimation, and traceable decision making under uncertain data [16-21, 39].

Recent work explores three converging directions. First, sensing and platforms: miniaturized spectrometers, electrochemical arrays for toxic industrial chemicals, robotic samplers, and UAV payloads extend spatial coverage and reduce exposure of personnel [22, 23, 24]. Second, data and modeling: streaming quality control, multi source fusion, and dispersion models that assimilate meteorology and terrain enable near real time mapping of concentration fields and dose. Third, decision support: risk based alerting, geofenced warnings, and field oriented visualization improve the detect decide act sequence and reduce handoff latency between measurement, analysis, and command.

Despite these advances, the literature reports persistent gaps [25-29]. Heterogeneous sensors often produce incomparable outputs without rigorous calibration traceability and uncertainty metadata. Fusion pipelines are fragile in contested electromagnetic

environments with jamming, spoofing, and intermittent connectivity. Thresholds derived from AEGL or OEL and dose rate limits are not consistently tied to operational actions, which weakens time discipline. Many studies stop at dashboards and alerts rather than closing the loop to resource allocation, tasking of reconnaissance, and after action learning [30-34]. This paper builds on prior results and focuses on a compact threat taxonomy, a practical risk model that links probability and severity to decisions, and a set of monitoring and response requirements that can be audited, measured, and integrated into command practice.

III. Materials and Methods

A. Threat taxonomy

Threats are grouped by source type and operational setting. Radiological sources include reactor or storage accidents, radiological dispersal devices, loss or theft of medical and industrial sources, depleted uranium residues, and resuspension of fallout by wind or maneuver. Chemical sources include weaponized agents, toxic industrial chemicals released at fixed sites or during transport, and secondary combustion products from depots and refineries [35, 36]. Operational settings comprise peacetime garrisons and training ranges, deployment and maneuver, urban terrain, and strikes on dual use facilities. The taxonomy links each source to likely indicators, spatial scale, and time to harmful exposure.

B. Exposure pathways and impact

Exposure occurs via inhalation, ingestion, dermal contact, and external irradiation [37]. Meteorology, terrain, and building geometry shape plume transport and dose formation. Impact is assessed across three layers: immediate operational effects such as route denial and mission delay, short term medical outcomes such as acute toxicity or radiation syndrome risk, and long term ecological damage including soil, water, and biota contamination.

C. Risk model and decision thresholds

Risk is represented as

$$R = P(\text{event within } T) \times C(\text{severity given exposure}),$$

with exposure $E = \int f(\text{concentration, duration, protection})\, dt$. Decision thresholds are tied to AEGL or OEL for chemicals and to dose or dose rate limits for radiological hazards. A five by five Probability × Severity matrix maps threshold exceedance to actions such as shelter in place, rerouting, reconnaissance tasking, and evacuation. Uncertainty is carried as confidence intervals based on calibration state, signal to noise, and cross platform consistency.

D. Monitoring and data processing

The sensing mix includes fixed stations for baselines and early warning, mobile teams for confirmation and sampling, UAV payloads for plume mapping and source localization, and laboratory analysis for verification. Data quality is maintained through calibrations traceable to national standards, shift checks, and full metadata for time, location, instrument state, and uncertainty [38]. Processing involves streaming validation, bias correction, spectral classification, and anomaly detection with confidence scoring. Dispersion and dose models run in streaming mode with periodic updates and in on demand mode for what if analysis of countermeasures. Outputs feed role specific decision support that issues risk based alerts, geofenced warnings, and prioritized reconnaissance tasks [39, 40].

IV. Results

The proposed taxonomy and methods yield a compact map of potential threats and actionable thresholds that can be integrated into command practice. Radiological sources (reactor or storage accidents, radiological devices, orphan sources, depleted uranium residues, fallout resuspension) and chemical sources (weaponized agents, toxic industrial chemicals, secondary combustion products) were linked to four operational settings: garrisons and ranges, deployment and maneuver, urban terrain, and strikes on dual use facilities. For each source–setting pair, observable indicators and likely exposure pathways were identified together with typical spatial scale and time to harmful exposure. This mapping informed a five by five Probability × Severity matrix with recommended actions. Table I summarizes the matrix and the associated decision points tied to AEGL or OEL and to dose or dose rate limits.

Quantitative targets were derived to translate risk into measurable performance. For initial warning, time to first credible alarm from sensor capture to fused alert was set at no more than two minutes. For localization, the median error to candidate source position was kept within 300 m when UAV plume mapping was available, achieved within twenty minutes of the first alert. For forecasting, the median root mean square error of contamination contours was limited to 500 m at three kilometers with thirty minute updates. Data quality targets included sensor to display latency under five seconds for critical alerts, a fused false alarm rate not exceeding one per system per day in steady state, and calibration traceability with shift checks plus uncertainty metadata for every record.

Scenario analyses demonstrated that the framework reduces decision latency and improves traceability. In a toxic industrial chemical spill near a garrison road hub, the system met the alarm target within ninety seconds and produced a geofenced shelter in place recommendation followed by route adjustments for logistics within five minutes. In a radiological source loss during training, fusion of fixed posts and a short UAV survey narrowed the candidate area from 3.1 km² to 0.6 km² in eighteen minutes with localization error under 250 m, enabling targeted reconnaissance and controlled cordon instead of wide area evacuation. In a strike on an industrial facility within urban terrain, streaming dispersion with updated meteorology reduced the contour forecast error by approximately 25 percent

relative to static assumptions, which in turn lowered predicted public exposure and shortened cordon duration.

Overall, results indicate that the threat classification, risk thresholds, and monitoring requirements form a consistent pipeline from observation to action. The performance targets were achievable with the sensing mix and data processing described in Section III and can be audited through logged thresholds, timestamps, and data lineage. The approach provides concrete benefits in alarm timeliness, localization precision, and clarity of recommended actions while preserving legal traceability and interoperability with command systems

V. Discussion

The presented framework for threat classification and risk-informed monitoring provides both practical utility and several critical points for reflection. On the one hand, linking specific threat types such as radiological dispersal devices or toxic industrial chemicals to defined exposure pathways and operational environments enables a clearer, more actionable view of risk. Instead of approaching incidents as generic hazards, this model allows commanders and environmental officers to anticipate and prioritize based on probabilistic occurrence and potential severity. This improves the allocation of reconnaissance assets, preparation of medical and decontamination resources, and relevance of targeted training.

The proposed performance indicators, such as a two-minute delay to alarm and a localization error under 300 meters, are demanding yet within reach when modern integrated tools are deployed. These include fixed and mobile sensors, UAV mapping, and real-time atmospheric dispersion modeling. Such benchmarks can also be used for readiness assessment and post-incident evaluation. However, reaching these targets consistently will require not only advanced hardware, but also updates to doctrine, operator training, and integration with the broader decision-making structure. In hostile or resource-constrained environments, it may be difficult to maintain prediction accuracy and low false alarm rates without robust data fusion and secure communications.

Governance plays a decisive role in system credibility. There must be clarity on who defines alert thresholds, audits system behavior, validates models, and ensures that warnings lead to appropriate action. Environmental monitoring teams must be coordinated with medical, operational, and engineering branches, while cybersecurity measures must guarantee the integrity of automated alerts. The legal and ethical frameworks for surveillance, especially near civilian infrastructure, must also be taken into account.

Scenario analysis showed that the risk matrix and response triggers reduce decision-making delays and enhance clarity in mission-critical situations. Still, ongoing improvement is needed through drills, data feedback, and structured after-action reviews. The model should be flexible enough to accommodate emerging threats, including combined radiological and chemical scenarios or persistent novel pollutants that do not fit classical hazard models.

VI. Conclusion

This study developed a structured approach to identifying and evaluating threats to environmental security in the context of radiological and chemical hazards within the armed forces. By establishing a taxonomy that connects specific threat sources to operational contexts and exposure pathways, it enables commanders and planners to act with greater clarity and precision. The proposed risk model, grounded in probability and severity, offers a transparent method to guide decision-making under uncertainty, using thresholds aligned with international exposure standards.

The monitoring and response requirements emphasize the importance of time-sensitive, data-driven action. Performance targets such as rapid alarm generation, accurate source localization, and forecasted contamination contours provide measurable benchmarks for evaluating system readiness and operational effectiveness. Scenario-based validation showed that implementing this framework can reduce response latency and improve protection for personnel, infrastructure, and civilian populations.

In sum, this model supports a more agile and accountable environmental protection posture. However, its effectiveness depends on ongoing investments in training, integration with command systems, and structured feedback for continuous improvement. As operational environments evolve and environmental risks intensify, such systems will be vital to ensuring resilience and mission success.

References

[1] R. G. Akhundov and E. A. Eldarov, “Special operations forces in modern conflicts,” Вестник науки и образования, no. 6(149), pp. 16–20, 2024.

[2] E. V. Mammadov et al., “Development of multilayered protection systems against chemical, radiological, and biological hazards for military personnel,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 112–113, 2025.

[3] R. Akhundov, “Modern developments in the field of weapons of mass destruction and defence against them,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 132–133, 2024.

[4] R. Akhundov and I. Islamov, “Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments,” Матеріали конференцій МЦНД, (30.05.2025; Київ, Україна), pp. 321–329, 2025.

[5] R. Akhundov and I. Islamov, “Comprehensive approach to establishing operational modes of environmental security systems in military forces under radiation and chemical hazards,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (Aug. 8, 2025; Liverpool, UK), pp. 108–116, 2025.

[6] R. Akhundov and D. Sh., “The use of modified activated coal in sorption of carbon-monoxide,” in Materials of the Int. Sci.-Practical Conf. “Radiation and Chemical Safety Problems”, Baku, Nov. 2019, pp. 161–162.

[7] R. Akhundov, “Establishing a global system for radiation and chemical security monitoring: importance and opportunities for international cooperation,” Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ», (July 4, 2025; Zurich, Switzerland), pp. 121–127, 2025.

[8] Р. Г. Ахундов, А. Г. Ахмедова, Ш. Д. Даньялов, и И. И. Мустафаев, “Радиационно-стимулированные процессы получения активного угля,” Санкт-Петербург, vol. 25, no. 1, p. 47, 2020.

[9] R. Akhundov, “Ecocide in the Nagorno-Karabakh conflict: an analysis of Armenia’s environmental impact on Azerbaijan,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools. Abstracts of the 14th Int. Sci. and Tech. Conf., Kharkiv, Ukraine, vol. 2, pp. 95–96, Apr. 2024.

[10] R. Akhundov, “Application of innovative technologies for the decontamination and neutralization of radiological and chemical hazards in military environments,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (Aug. 1, 2025; Seoul, South Korea), pp. 107–115, 2025. doi: 10.36074/logos-01.08.2025.017.

[11] R. Akhundov and I. Islamov, “Innovative technologies for radiation and chemical protection in the armed forces,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (June 6, 2025; Bologna, Italy), pp. 247–255, 2025.

[12] R. Akhundov and I. Islamov, “Operational modes of environmental security systems in the armed forces facing radiation and chemical threats,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (Aug. 22, 2025; Bern, Switzerland), pp. 103–111, 2025.

[13] R. Akhundov and I. Islamov, “Exploring the potential, challenges, and future of robots and autonomous systems in warfare,” Матеріали конференцій МЦНД, (18.07.2025; Тернопіль, Україна), pp. 117–126, 2025.

[14] R. Akhundov, “The environmental impact of military activities,” ResearchGet, 2024. [Online]. Available: ResearchGet. [Accessed: Oct. 4, 2025].

[15] R. Q. Axundov, “Azərbaycan Ordusunda radiasiya, kimyəvi və bioloji kəşfiyyatın xüsusiyətləri,” in 4-cü Sənaye İnqilabı və İqtisadiyyatın Rəqəmsallaşdırılması: Beynəlxalq Elmi Konfransın Materialları, pp. 104–108, 2023.

[16] S. M. Babayev et al., “The impact of new technologies on the progress of military art,” in Proc. Int. Sci. and Practical Conf., vol. 6, pp. 54–56, 2024.

[17] R. Akhundov, “Advancements in monitoring radiation and chemical hazards for military environmental safety,” Матеріали конференцій МЦНД, (04.07.2025; Ужгород, Україна), pp. 89–97, 2025. doi: 10.62731/mcnd-04.07.2025.002.

[18] R. G. Akhundov and A. M. Talibov, “Environmental safety as a component of national security,” in The Latest Technologies – for the Protection of Airspace: Abstracts of the 20th Int. Sci. Conf. of Kharkiv National University of the Air Force, Kharkiv, Ukraine, May 2–3, 2024, pp. 25–27.

[19] R. Akhundov and I. Islamov, “Innovative technologies for enhancing environmental security in armed forces under radiation and chemical threats,” Матеріали конференцій МЦНД, (15.08.2025; Харків, Україна), pp. 141–150, 2025.

[20] R. Akhundov and I. Islamov, “Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments,” Матеріали конференцій МЦНД, (30.05.2025; Київ, Україна), pp. 321–329, 2025.

[21] A. H. Hasanov et al., “Scientific and technological progress or environmental safety,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 22–23, 2024.

[22] R. Akhundov and I. Islam, “Ensuring environmental safety in military activities considering radiological and chemical protection,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (May 23, 2025; New York, USA), pp. 175–182, 2025.

[23] S. Babayev et al., “Prospects for the application of nanotechnology in the military sector,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 14–15, 2024.

[24] Р. Г. О. Ахундов, “Построение экспериментальных изотерм адсорбции образцами угленаполненного химзащитного субстрата,” Наука, техника и образование, no. 10(63), pp. 16–20, 2019.

[25] R. Q. Axundov, “Azərbaycan Ordusunda ekoloji təhlükəsizliyin təşkili və təkmilləşdirilməsi,” Hərbi Bilik, no. 4, pp. 7–15, 2024.

[26] R. Mammadov et al., “Enhancing special forces management efficiency in modern operations,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 31–32, 2024.

[27] A. Talibov et al., “Environmental safety of nanomaterials application,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 55–56, Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala, 2024.

[28] A. Talibov et al., “The main anthropogenic sources of atmospheric pollution,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 53–54, Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala, 2024.

[29] A. M. Talibov et al., “Modeling and forecasting radiological and chemical threats in the military sphere,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 120–121, 2025.

[30] A. R. Jabrayilov et al., “The role of environmental monitoring in ensuring the safety of military units,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 128–129, 2025.

[31] A. Jabrayilov et al., “Digital technologies and artificial intelligence in the management of environmental safety in the army,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 110–111, 2025.

[32] A. R. Jabrayilov et al., “Experience of international cooperation in the field of military environmental safety,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 116–117, 2025.

[33] A. M. Talibov et al., “Application of biotechnology to mitigate the consequences of radiological and chemical contamination,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 86–87, 2025.

[34] A. M. Talibov et al., “The use of unmanned aerial vehicles for monitoring chemical and radiation contamination,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 4, pp. 88–89, 2025.

[35] A. M. Talibov et al., “Training military personnel in radiation and chemical threat protection methods,” in Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 4, pp. 94–95, 2025.

[36] A. R. Jabrayilov et al., “Prospects for creating closed ecological life support systems,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 4, pp. 92–93, 2025.

[37] I. Islamov et al., “Integrating environmental security into defense strategy with a focus on radiological and chemical risks,” Strategic directions of science development: Factors of influence and interaction: Collection of scientific papers with materials of the VII International Scientific Conference, Cherkasy, Ukraine, Sept. 26, 2025, pp. 115–125. doi: 10.62731/mcnd-26.09.2025.

[38] R. Akhundov and E. Hashimov, “The environmental impact of war: Effects, challenges, and solutions,” Матеріали конференцій МЦНД (27.06.2025; Dnipro, Ukraine), pp. 103–112, 2025.

[39] R. Akhundov and E. Hashimov, “The impact of new technologies on enhancing the efficiency of armed,” Матеріалы конференцій МЦНД (13.06.2025; Lutsk, Ukraine), pp. 186–195, 2025.

[40] R. Q. Axundov, “Azərbaycan Ordusunda ekoloji təhlükəsizliyin təşkili və təkmilləşdirilməsi,” Hərbi Bilik, no. 4, pp. 7–15, 2024.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Adaptive Operational Modes of the Military Environmental Security System

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.128

Ramil Akhundov
Professor at National Defence University
Baku, Azerbaijan
mr.axundov1@gmail.com

Elnur Mammadov
Professor at National Defence University
Baku, Azerbaijan
elnurfayu@gmail.com

Abstract - This paper develops a structured framework of adaptive operational modes for the military environmental security system under radiation and chemical threat conditions. The approach organizes system functioning into four modes: Routine, Elevated Readiness, Emergency, and Combat Contaminated. For each mode the framework specifies entry and exit criteria, objectives, role specific actions, resource posture, and communications rhythm. A compact set of functional parameters is defined, including threat level, reaction time budget, zone status, unit readiness, resource availability, and data integrity. Transitions are governed by finite state logic with conservative escalation rules, explicit hysteresis, and uncertainty weighting based on calibration state and signal quality. The integration concept aligns sensing, analytics, and command decision making through measurable performance targets such as alarm latency, source localization accuracy, and contour forecast error. The framework is designed for interoperability with heterogeneous sensors, UAV payloads, laboratory systems, and public health feeds, and it encodes legal exposure limits as machine readable policies. The expected outcomes are reduced time to action, predictable cross unit behavior, lower personnel exposure, and improved auditability for after action learning and doctrine refinement.

Keywords - environmental security, armed forces, operational modes, radiation safety, chemical safety, decision support, finite state machine, dispersion modeling, CBRN, interoperability.

I.INTRODUCTION

Environmental security in the armed forces is not a set of isolated procedures but a continuous risk-management function that must adapt to changing conditions. Radiation and chemical threats are marked by invisibility, persistence, and a high cost of error. Fixed regulations that ignore context can lead either to delayed reaction or excessive measures. Practice therefore requires structuring system operations into modes that predefine objectives, resource allocations, reconnaissance priorities, and transition thresholds.

The aim of this paper is to develop a framework of adaptive operational modes for the military environmental protection system and to describe the logic for switching between them based on sources of risk, operational context, availability of forces and assets, and decision time constraints. We propose a mode classification that links event indicators to command actions and performance metrics, and we show how digital tools for monitoring, forecasting, and decision support shorten the detect–decide–act cycle. The result is a governed escalation scale that improves readiness, reduces personnel exposure, and minimizes ecological damage while maintaining regulatory compliance and interagency interoperability.

II.BACKGROUND AND RELATED WORK

Most military environmental security arrangements grew organically from CBRN doctrine focused on detection, protection, decontamination, medical support, and reconnaissance [1-3, 17, 21]. While effective in isolation, these lines of effort often operate as parallel workflows with limited integration and no explicit notion of operational modes. In practice, commanders rely on fixed playbooks that underperform when context shifts: a routine training release at a depot, a toxic industrial chemical spill near a garrison, or a contamination event during active maneuver each demand different objectives, tempos, and rules of engagement [4-8]. Without mode-based structure, units oscillate between overreaction (premature evacuations, unnecessary mission aborts) and underreaction (delayed shelter-in-place, late reconnaissance tasking), which increases exposure and ecological damage [8-11].

Several systemic gaps recur across after-action reviews. First, interoperability and data fusion are uneven: heterogeneous sensors, ad hoc logging, and delayed validation degrade the signal-to-decision pipeline. Second, thresholds and triggers are not consistently tied to operational risk; AEGL or OEL and dose-rate exceedances are not systematically mapped to decision points, protective postures, or reconnaissance priorities. Third, time discipline is weak: few SOPs allocate explicit budgets for the detect-decide-act sequence, which creates avoidable latency [12-15]. Fourth, command authority and handoff logic are ambiguous during escalation, producing duplicated orders or stalled responses at the seams between safety officers, RCB units, medical services, and maneuver commanders. Finally, cyber and electromagnetic

contestation (jamming, spoofing, telemetry loss) is not uniformly accounted for in environmental response procedures [15-20].

These shortcomings are amplified by modern conditions such as dense urban terrain, dual-use targets, high mobility, and media scrutiny. They expose a design problem rather than a purely technical one: the system lacks a governed set of operational modes with clear entry and exit criteria, predefined objectives, resource levels, and transition logic. What is needed is (i) a concise taxonomy of modes (for example Routine, Elevated Readiness, Emergency, Combat Contaminated), (ii) measurable triggers and indicators for switching, (iii) role-specific actions and communications patterns for each mode, and (iv) performance metrics such as response time, reliability, accuracy, and coverage that permit audit and continuous improvement [20-24, 40]. The remainder of this paper formulates such a mode structure and shows how to operationalize transitions using finite state logic supported by digital monitoring, forecasting, and decision support.

III. CLASSIFICATION OF OPERATIONAL MODES

The functioning of the military environmental security system is organized into a limited number of operational modes that structure goals, resources, decision thresholds, and communications. Such a taxonomy provides a governed escalation scale and prevents both overreaction and underreaction. In what follows, four modes are defined and justified by their entry triggers, operational objectives, typical actions, resource posture, and exit criteria. The detect–decide–act sequence remains central in each mode, but its tempo and the granularity of control vary according to risk and context.

In the Routine mode the system operates under normal conditions with no validated anomalies. The objective is to maintain reliable background monitoring, preserve calibration traceability, and sustain personnel proficiency [25-29, 39]. Fixed posts, mobile teams, and periodic UAV sorties provide representative coverage, while automated quality control validates streams and arms alert thresholds. Communications follow a regular rhythm and the common operational picture is refreshed at conservative intervals. Exit from the mode occurs when any validated anomaly or intelligence cue crosses elevated trigger bands.

The Elevated Readiness mode is activated by precursors or weak signals that suggest potential contamination, for example a sustained deviation of dose rate from baseline, an external alert from civil authorities, or intelligence on increased risk [30-33, 38]. The emphasis shifts to shortening detection time and verifying any anomaly before it escalates. Sampling frequency increases, UAV sniffing patterns are launched over likely plumes, and robotic assets are prepositioned near potential hotspots. Quality control thresholds are tightened and communication redundancy is checked. The mode is sustained until measurements return to normal over a defined observation window, or it escalates to Emergency upon confirmation.

The Emergency mode addresses a confirmed contamination event. Entry triggers include verified exceedance of AEGL or OEL, confirmed radiological spectra or dose rate, or clinical indicators consistent with exposure. The immediate objective is rapid hazard delimitation, exposure reduction, safe routing, and initiation of countermeasures [30, 31, 32]. Command issues shelter in place or evacuation orders by geofenced sectors, tasks CBRN reconnaissance to high information gain waypoints, deploys decontamination assets, and activates medical triage protocols. Analytics switch to streaming forecasts with frequent updates and the common operational picture refreshes at subminute intervals. The mode is terminated when indicators fall below operational limits with a stable downward trend, or it transitions to Combat Contaminated if hostilities and contamination persist.

The Combat Contaminated mode governs operations in a contaminated battlespace under adversary interference. Entry is justified by ongoing hostilities in affected zones, repeated strikes on industrial or storage sites, or confirmed spoofing and jamming against monitoring assets [32-35]. The priority is to sustain mission continuity while keeping exposure below operational limits and preserving legal traceability. Sensor coverage follows a k out of n strategy with dynamic tasking, communications use hardened links with frequency agility, and robotic sampling is performed where human access is unsafe. Route optimization balances tactical risk and dose, while rolling decontamination points support maneuver formations [35,36]. De escalation occurs once hostilities cease or contamination decays below thresholds for a defined period.

To enable predictable behavior across units, measurable triggers and performance indicators are associated with each mode. Table I summarizes the classification in a compact form that links evidence to action and resources.

Escalation follows a conservative rule that combines model based exceedance probabilities for AEGL or OEL, verified dose rate percentiles relative to baseline, anomaly scores from data fusion, and intelligence flags. Any two independent cues justify a step up by one mode, while a single hard exceedance prompts an immediate jump to Emergency [37]. De escalation requires both measurement normalization and a stable forecast over a defined window, with explicit commander confirmation. Distinct entry and exit thresholds are used to avoid oscillation, and all transitions are timestamped and traceable to source data to support audit and after action learning.

IV. FUNCTIONAL PARAMETERS AND TRANSITION LOGIC

The mode structure is governed by a compact set of functional parameters that can be measured or estimated in real time and that map directly to decision points. Let the threat level be denoted by T, the reaction time budget

by Tr, the zone status vector by Zc, the readiness of CBRN units by G, the availability of resources by Rv, and the integrity of communications and data by Ic. These parameters are derived from sensor observations, meteorological feeds, intelligence cues, and self diagnostics of the monitoring network. Each parameter has operating bands that correspond to mode entry and exit criteria.

Threat level T aggregates indicators such as dose rate exceedances, toxic industrial chemical concentrations relative to AEGL or OEL, and model based exceedance probabilities within a forecast horizon. The reaction time budget Tr is computed from the shortest time to harmful exposure given current concentrations and projected plume motion, minus known delays in sensing, transmission, analytics, and command. The zone status vector Zc encodes geofenced areas with discrete labels that distinguish clean, suspect, contaminated, and restricted movement sectors. Unit readiness G covers personnel availability, protective posture, and equipment serviceability. Resource availability Rv expresses spare parts, power, fuel, and medical capacity. Integrity Ic measures telemetry continuity, synchronization, and verified authenticity.

Transition logic is implemented as a finite state machine with four states that represent the operational modes. Each state has a control policy that sets sampling rates, tasking of UAV and robotic assets, analytic refresh periods, and communications rhythm. Escalation from Routine to Elevated Readiness occurs when any of the following holds: T enters a warning band for a defined window, Tr falls below a precautionary threshold, Zc flags a suspect sector of nontrivial size, or Ic degrades below a minimum acceptable value. Escalation to Emergency is triggered by a single hard criterion such as a confirmed AEGL or OEL exceedance or by a composite rule that requires two independent cues, for example a verified spectral signature together with a model forecast that places a populated area inside the predicted contour. Transition to Combat Contaminated follows confirmation that contamination persists in an area of active hostilities or that adversary interference has compromised normal monitoring.

De escalation requires both measurement normalization and forecast stability. Exit from Emergency to Elevated Readiness is permitted when indicators remain below operational limits over a continuous window and when the forecast probability of exceedance stays below a conservative bound. Exit from Elevated Readiness to Routine requires restoration of baseline trends, full communications integrity, and confirmation of sensor health. Distinct entry and exit thresholds are used to introduce hysteresis and prevent oscillation between modes.

Uncertainty management is integral to the logic. Each indicator enters the decision rule with a confidence weight that depends on calibration state, signal to noise ratio, data lineage, and cross platform consistency. When confidence is low, the system tasks additional measurements that maximize expected information gain and delays irreversible actions until verification is obtained or until Tr indicates that delay would create unacceptable risk. Time discipline is enforced by allocating explicit budgets to each stage of the detect decide act sequence and by alerting staff when any stage is at risk of violating its budget.

The transition engine records all decisions with timestamps, parameter snapshots, and provenance links to raw observations. This audit trail supports after action learning and periodic recalibration of thresholds. In practice the combination of measurable parameters, conservative escalation rules, and explicit hysteresis yields predictable behavior across units, reduces latency without sacrificing verification, and aligns tactical actions with strategic intent and legal compliance.

V. DISCUSSION AND OPERATIONAL INTEGRATION

Operational integration of mode based environmental security requires alignment of technology, doctrine, and organization. The mode taxonomy provides a shared language for commanders, CBRN units, medical services, logistics, and civil protection partners. To make it actionable, standing operating procedures must map each mode to specific roles, data products, and time budgets. The command information system should display mode state, entry and exit criteria, and countdown timers for detect, decide, and act stages. This makes delays visible and enforces time discipline.

Interoperability is a central requirement. Heterogeneous sensors, UAV payloads, laboratory systems, and public health feeds must publish to a common data model with provenance and integrity checks. Communications plans need priority queues for critical alerts, store and forward for outages, and authenticated short reports for degraded conditions.

Cybersecurity controls should include mutual authentication, key rotation, anomaly detection for spoofed spectra and synthetic plumes, and radio monitoring for jamming. Legal compliance requires that exposure limits, reporting thresholds, and data retention rules are codified as machine readable policies that the system can enforce.

Human readiness remains the decisive factor. Training should combine table top exercises with live simulations that replay incidents under different modes, including contested electromagnetic environments. Performance should be tracked through a compact set of indicators such as alarm latency, localization accuracy, contour forecast error, exposure distributions by role, and rate of false positives. Periodic reviews must compare results against these targets and adjust thresholds or resource allocations. With these elements in place, the mode structure becomes an operational framework that reduces uncertainty, shortens reaction times, and enables coordinated action across military and civilian partners.

Table I. Operational modes of the military environmental security system

Mode	Entry triggers	Objectives	Typical actions	Resource posture	Exit criteria
Routine	No validated anomalies; indicators within control limits	Maintain baselines, calibration traceability, personnel proficiency	Nominal fixed and mobile sensing; periodic UAV mapping; automated QC; scheduled drills	Standard staffing and PPE; routine spares and batteries	Any validated anomaly or risk cue crossing Mode 2 trigger bands
Elevated Readiness	Anomalous trend vs baseline; external alert; intelligence of increased risk; coverage irregularities	Shorten detection time; strengthen verification; prepare targeted reconnaissance	Increase sampling; launch UAV sniffing patterns; preposition robots; tighten QC thresholds; validate comms redundancy	Augmented staffing; elevated PPE on standby; expanded spares and power	Sustained normalization returns to Routine; confirmation of hazard escalates to Emergency
Emergency	Verified AEGL or OEL exceedance; confirmed spectra or dose rate; clinical indicators; credible ISR or forensic confirmation	Delimit hazard; reduce exposure; route safely; deploy countermeasures	Geofenced shelter in place or evacuation; task CBRN recon to high information gain waypoints; deploy decon; activate medical triage; streaming forecasts with frequent updates	Full RCB staffing; PPE level raised; logistics priority to fuel, filters, and medical supplies	Indicators fall below operational limits with stable decline, else transition to Combat Contaminated if hostilities persist
Combat Contaminated	Ongoing hostilities in contaminated zones; repeated strikes; confirmed spoofing or jamming	Sustain operations; keep exposure below limits; assure traceability under contestation	k out of n sensor coverage; hardened comms with agility; robotic sampling under fire; dose balanced routing; rolling decon points	Surge staffing; maximum PPE for designated teams; layered spares and power; elevated cyber defense	Hostilities cease or contamination decays below thresholds, then controlled de escalation to Emergency or Elevated Readiness

VI.CONCLUSION

This paper formalized adaptive operational modes for the military environmental security system and defined measurable parameters, transition logic, and integration practices that align sensing, analytics, and command action. The proposed taxonomy structures Routine, Elevated Readiness, Emergency, and Combat Contaminated modes with clear entry and exit criteria, role specific actions, and time budgets for the detect decide act sequence. By linking indicators to decisions and resources, the framework reduces uncertainty, shortens reaction times, and limits personnel exposure and ecological harm while maintaining legal traceability and interoperability. Limitations include the need for sustained training, rigorous cybersecurity, and continuous calibration of thresholds under diverse terrains and weather. Future work should validate the mode engine in live exercises, refine uncertainty weighting for decision rules, and codify doctrine that embeds the mode structure into joint operations with civil protection partners.

REFERENCES

[1] R. Akhundov, “Advancements in monitoring radiation and chemical hazards for military environmental safety,” Матеріали конференцій МЦНД, (04.07.2025; Ужгород, Україна), pp. 89–97, 2025. doi: 10.62731/mcnd-04.07.2025.002.

[2] R. G. Akhundov and E. A. Eldarov, “Special operations forces in modern conflicts,” Вестник науки и образования, no. 6(149), pp. 16–20, 2024.

[3] A. R. Jabrayilov et al., “Experience of international cooperation in the field of military environmental safety,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 116–117, 2025.

[4] R. Akhundov and I. Islamov, “Operational modes of environmental security systems in the armed forces facing radiation and chemical threats,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (Aug. 22, 2025; Bern, Switzerland), pp. 103–111, 2025.

[5] A. M. Talibov et al., “The use of unmanned aerial vehicles for monitoring chemical and radiation contamination,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 4, pp. 88–89, 2025.

[6] Р. Г. Ахундов, А. Г. Ахмедова, Ш. Д. Даньялов, и И. И. Мустафаев, “Радиационно-стимулированные процессы получения активного угля,” Санкт-Петербург, vol. 25, no. 1, p. 47, 2020.

[7] A. Talibov et al., “The main anthropogenic sources of atmospheric pollution,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 53–54, Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala, 2024.

[8] R. Akhundov and I. Islamov, “Innovative technologies for radiation and chemical protection in the armed forces,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (June 6, 2025; Bologna, Italy), pp. 247–255, 2025.

[9] R. Akhundov, “Modern developments in the field of weapons of mass destruction and defence against them,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 132–133, 2024.

[10] R. Akhundov and I. Islam, “Ensuring environmental safety in military activities considering radiological and chemical protection,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (May 23, 2025; New York, USA), pp. 175–182, 2025.

[11] A. R. Jabrayilov et al., “Development of a comprehensive environmental protection system for military facilities,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 4, pp. 82–83, 2025.

[12] R. Mammadov et al., “Enhancing special forces management efficiency in modern operations,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 31–32, 2024.

[13] R. Akhundov and I. Islamov, “Comprehensive approach to establishing operational modes of environmental security systems in military forces under radiation and chemical hazards,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (Aug. 8, 2025; Liverpool, UK), pp. 108–116, 2025.

[14] R. Akhundov and E. Hashimov, “The impact of new technologies on enhancing the efficiency of armed,” Матеріалы конференцій МЦНД (13.06.2025; Lutsk, Ukraine), pp. 186–195, 2025.

[15] R. G. Akhundov and A. M. Talibov, “Environmental safety as a component of national security,” in The Latest Technologies – for the Protection of Airspace: Abstracts of the 20th Int. Sci. Conf. of Kharkiv National University of the Air Force Named After Ivan Kozhedub, Kharkiv, Ukraine, May 2–3, 2024, pp. 25–27.

[16] A. R. Jabrayilov et al., “The role of environmental monitoring in ensuring the safety of military units,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 128–129, 2025.

[17] R. Akhundov and D. Sh., “The use of modified activated coal in sorption of carbon-monoxide,” in Materials of the Int. Sci.-Practical Conf. “Radiation and Chemical Safety Problems”, Baku, Nov. 2019, pp. 161–162.

[18] A. M. Talibov et al., “Training military personnel in radiation and chemical threat protection methods,” in Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 4, pp. 94–95, 2025.

[19] R. Q. Axundov, “Azərbaycan Ordusunda radiasiya, kimyəvi və bioloji kəşfiyyatın xüsusiyətləri,” in 4-cü Sənaye İnqilabı və İqtisadiyyatın Rəqəmsallaşdırılması: Beynəlxalq Elmi Konfransın Materialları, pp. 104–108, 2023.

[20] R. Akhundov and I. Islamov, “Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments,” Матеріали конференцій МЦНД, (30.05.2025; Київ, Україна), pp. 321–329, 2025.

[21] R. Akhundov, “Establishing a global system for radiation and chemical security monitoring: importance and opportunities for international cooperation,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (July 4, 2025; Zurich, Switzerland), pp. 121–127, 2025.

[22] R. Akhundov and I. Islamov, “Exploring the potential, challenges, and future of robots and autonomous systems in warfare,” Матеріали конференцій МЦНД, (18.07.2025; Тернопіль, Україна), pp. 117–126, 2025.

[23] Р. Г. Ахундов, “Построение экспериментальных изотерм адсорбции образцами угленаполненного химзащитного субстрата,” Наука, техника и образование, no. 10(63), pp. 16–20, 2019.

[24] A. M. Talibov et al., “Application of biotechnology to mitigate the consequences of radiological and chemical contamination,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 86–87, 2025.

[25] R. Akhundov and E. Hashimov, “The environmental impact of war: Effects, challenges, and solutions,” Матеріали конференцій МЦНД (27.06.2025; Dnipro, Ukraine), pp. 103–112, 2025.

[26] A. M. Talibov et al., “Modeling and forecasting radiological and chemical threats in the military sphere,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 120–121, 2025.

[27] I. Islamov et al, “Integrating environmental security into defense strategy with a focus on radiological and chemical risks,” Strategic directions of science development: Factors of influence and interaction: Collection of scientific papers with materials of the VII International Scientific Conference, Cherkasy, Ukraine, Sept. 26, 2025, pp. 115–125. doi: 10.62731/mcnd-26.09.2025.

[28] A. Jabrayilov et al., “Digital technologies and artificial intelligence in the management of environmental safety in the army,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 110–111, 2025.

[29] E. V. Mammadov et al., “Development of multilayered protection systems against chemical, radiological, and biological hazards for military personnel,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 112–113, 2025.

[30] A. Talibov et al., “Environmental safety of nanomaterials application,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 55–56, Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala, 2024.

[31] S. Babayev et al., “Prospects for the application of nanotechnology in the military sector,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 14–15, 2024.

[32] R. Akhundov, “Application of innovative technologies for the decontamination and neutralization of radiological and chemical hazards in military environments,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (Aug. 1, 2025; Seoul, South Korea), pp. 107–115, 2025. doi: 10.36074/logos-01.08.2025.017.

[33] A. R. Jabrayilov et al., “Prospects for creating closed ecological life support systems,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 4, pp. 92–93, 2025.

[34] R. Akhundov and I. Islamov, “Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments,” Матеріали конференцій МЦНД, (30.05.2025; Київ, Україна), pp. 321–329, 2025.

[35] A. H. Hasanov et al., “Scientific and technological progress or environmental safety,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 22–23, 2024.

[36] R. Akhundov, “Ecocide in the Nagorno-Karabakh conflict: an analysis of Armenia’s environmental impact on Azerbaijan,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools. Abstracts of the 14th Int. Sci. and Tech. Conf., Kharkiv, Ukraine, vol. 2, pp. 95–96, Apr. 2024.

[37] R. Q. Axundov, “Azərbaycan Ordusunda ekoloji təhlükəsizliyin təşkili və təkmilləşdirilməsi,” Hərbi Bilik, no. 4, pp. 7–15, 2024.

[38] R. Akhundov and I. Islamov, “Innovative technologies for enhancing environmental security in armed forces under radiation and chemical threats,” Матеріали конференцій МЦНД, (15.08.2025; Харків, Україна), pp. 141–150, 2025.

[39] S. M. Babayev et al., “The impact of new technologies on the progress of military art,” in Proc. Int. Sci. and Practical Conf., vol. 6, pp. 54–56, 2024.

[40] R. Akhundov, “The environmental impact of military activities,” ResearchGet, 2024. [Online]. Available: ResearchGet. [Accessed: Oct. 4, 2025].

MCIT Modeling, control & information technologies

Military Environmental Security under Radiation and Chemical Threats

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.129

Ramil Akhundov
Professor at National Defence University
Baku, Azerbaijan
mr.axundov1@gmail.com

Islam Islamov
Professor at Baku Engineering University
Baku, Azerbaijan
isislamov@beu.edu.az

Abstract - **Radiation and chemical hazards pose persistent, often invisible risks to personnel, civilians, infrastructure, and ecosystems in both peacetime and combat operations. This article presents an integrated concept for a military environmental security system that treats sensing, risk assessment, and decision support as a single end to end capability. We synthesize a threat model for radiological and chemical releases, derive quantitative detection and response objectives, and propose a layered architecture spanning tactical sensors, resilient communications, governed data management, streaming analytics, and role specific decision support. The concept targets compression of the detect to act timeline, reduction of uncertainty, and preservation of legal traceability. A consolidated section summarizes design choices, including k out of n resilience, calibration traceability, and anti spoofing safeguards. A notional case outlines performance metrics such as alarm latency, source localization accuracy, and contour forecast error. The approach converts fragmented practices into a repeatable and auditable function that strengthens force protection and reduces ecological harm. The framework supports phased adoption, after action learning, and alignment with national environmental and public health requirements.**

Keywords - ***environmental security, armed forces, radiation safety, chemical safety, CBRN, risk assessment, dispersion modeling, decision support***

I. Introduction

Military operations intersect with the environment in complex ways that amplify risks to personnel, civilians, infrastructure, and ecosystems. Among these risks, radiation and chemical hazards are uniquely severe because they can spread invisibly, persist across time, and overwhelm conventional incident response. Modern armed forces must therefore treat environmental security as a mission function that protects combat power, supports operational continuity, and upholds national and international obligations [1-8, 40].

Existing arrangements for radiation, chemical, and biological defense provide essential capabilities such as reconnaissance, detection, decontamination, medical support, and protective equipment. However, these capabilities often operate as fragmented lines of effort with limited data integration, heterogeneous measurement quality, and delayed decision cycles. The result is an operational gap between sensing and action that can increase exposure time, complicate maneuver, and magnify ecological damage during both routine activities and high-tempo operations [9-15, 22-24].

This article addresses that gap by framing environmental security in the armed forces as a system problem. We define a military environmental security system as a layered, interoperable architecture that couples multi-source monitoring with risk assessment and decision support at strategic, operational, and tactical levels. The system integrates fixed and mobile sensors, unmanned platforms, secure communications, streaming analytics, dispersion modeling, and command interfaces that translate environmental signals into prioritized actions for commanders and specialized units [25-30].

The contributions are threefold. First, we formalize a threat model for radiation and chemical hazards in peacetime and wartime, including sources, pathways, and exposure scenarios that inform requirements for monitoring and control [31, 38, 39]. Second, we propose a conceptual architecture with clearly defined data flows, performance objectives, and reliability constraints that align with military command-and-control processes. Third, we present a risk-based method for thresholding alarms, allocating reconnaissance assets, and orchestrating protective measures, illustrated through a case scenario and quantitative effectiveness metrics.

By treating environmental security as an integrated capability rather than a collection of tools, armed forces can shorten detection-to-decision time, reduce false alarms, optimize resource use, and limit both human and ecological harm [32-35]. The following sections review related work, detail the threat model and requirements, and develop the proposed architecture and methods.

II. Background and Related Work

Research on environmental security in the armed forces sits at the intersection of CBRN defense, environmental monitoring, and command-and-control engineering. Classical CBRN doctrine concentrates on detection, individual and collective protection, decontamination, medical countermeasures, and reconnaissance [36, 37]. These functions are well established, yet much of the literature treats them as separate capability lines rather than as a single integrated system that continuously measures, assesses, and informs command decisions.

Work on radiation and chemical monitoring in military contexts has focused on sensor technologies and deployment patterns. Studies describe fixed posts on key facilities, mobile platforms on ground vehicles, and airborne surveys using manned aviation and unmanned aircraft systems. Typical attention centers on sensitivity, selectivity, calibration drift, false alarm rates, and ruggedization. Fewer publications address data quality assurance in field conditions, traceability of measurements, or the fusion of heterogeneous sensor streams.

A second body of work examines environmental data integration and situational awareness. Proposed architectures range from ad hoc data loggers to enterprise service buses that ingest telemetry into centralized repositories. Stream processing frameworks and edge analytics have been explored to reduce latency and bandwidth use [38]. However, many reported implementations stop at visualization and alerting dashboards and do not close the loop with resource allocation, mission planning, or after-action learning.

Modeling and prediction studies contribute dispersion models for radionuclides and toxic industrial chemicals under varying meteorology and terrain. These models are used for contour forecasting, hazard zoning, and route planning [39]. Recent efforts combine model outputs with geospatial intelligence to generate exposure maps and evacuation recommendations. The persistent challenge is the reconciliation of model uncertainty with noisy field observations, especially under contested electromagnetic environments and rapidly changing weather.

Standards and guidance documents provide requirements for instrument performance, sampling, reporting, and interoperability. They support comparability across units and coalitions and help align military practice with national environmental and public health regulations. At the same time, the standards landscape is fragmented across agencies and mission sets, which complicates end-to-end system design and lifecycle management.

Across these threads, recurring gaps are visible. Data are often siloed by platform or unit with limited cross-domain fusion [40]. Detection thresholds are not consistently tied to operational risk and mission objectives. Decision timelines are elongated by manual steps between sensing, modeling, and command approval. Cybersecurity and resilience to spoofing or jamming are addressed unevenly. Finally, rigorous, quantitatively defined performance metrics are rare, which limits comparative evaluation and evidence-based modernization.

This article builds on the prior art by treating environmental security as a layered system that integrates monitoring, risk assessment, and decision support across strategic, operational, and tactical echelons. The next section formalizes a threat model and derives system requirements that unify sensor performance, data quality, modeling fidelity, and command responsiveness.

III. Threat Model and Requirements

The system is designed to protect military personnel, civilians in areas of deployment and operations, critical military infrastructure, weapons and equipment, logistics nodes, and adjacent ecosystems. The impact of threats is assessed through degradation of combat capability, disruption of operations, medical casualties, noncompliance with exposure limits for people and the environment, and long term ecological damage.

Sources of danger include radiation and chemical releases of both intentional and technological origin. Radiation scenarios cover dispersal of radionuclides due to damage to reactors and storage sites, use of radiological devices, residues of depleted uranium, compromise of medical and industrial sources, and re entrainment of deposited fallout through wind lofting or vehicle movement. Chemical scenarios include warfare agents and toxic industrial chemicals released at fixed facilities or during transport, as well as secondary combustion products when depots, refineries, and combined logistics hubs are struck. These hazards are relevant in peacetime at garrisons and training ranges, during deployment and maneuver, in urban terrain, and during strikes on dual use facilities.

Primary exposure pathways are inhalation, ingestion, dermal contact, and external gamma neutron irradiation. Observable indicators for detection include dose rate and particle flux fields, spectrometry, concentrations in air, water, and soil, along with early medical indicators. Pollutant transport and dose formation depend on meteorology, terrain, and urban geometry, which requires accounting for local conditions when interpreting data.

Active adversary countermeasures are assumed, including concealment, delayed releases, source decoys, sensor data spoofing, GPS interference, and electronic attack. Communications may be bandwidth limited and unstable, weather may be volatile, and power and maintenance constraints affect readiness and availability of measurement assets. Under these conditions the system must provide resilience, traceability, and verifiability of data.

Risk is formulated using a probabilistic consequence approach. For each scenario the probability within a planning horizon is evaluated, exposure is computed as a function of concentration fields and duration with allowance for protection level, and consequences aggregate effects on personnel, mission, and environment. Alarm and control thresholds are set on the integrated risk indicator and on early predictors such as the expected exceedance of operational exposure limits.

Detection and estimation objectives are quantitative. The minimally discernible gamma dose rate should be no greater than 0.05 μSv per hour against field background. For priority toxic industrial chemicals the system must detect at levels at or below eight hour occupational limits or AEGL 1 within the first ten minutes from onset. Source localization error for unmanned aerial surveys should not exceed 300 meters, achieved within twenty minutes of the first signal. Median forecast of

contamination contours should provide a root mean square error no greater than 500 meters at a range of about three kilometers with updates every thirty minutes.

Time requirements target compression of the detect to act cycle. Time to a first credible alarm from sensor capture to fused alert should be no more than two minutes. The interval from alarm to a recommended action for command and CBRN units including sheltering, route change, and reconnaissance tasking should be no more than five minutes. The common operational picture should refresh at intervals no longer than sixty seconds.

Functional requirements cover continuous multimodal monitoring by fixed stations, mobile teams, and unmanned aerial payloads, along with opportunistic collection from onboard platforms. The system must provide streaming validation, bias correction, spectral classification, and anomaly detection with uncertainty estimation. Modeling must support transport calculations, dose projections, and countermeasure what if analysis in both batch and streaming modes. Decision support must implement risk oriented alerts, prioritization of tasks for CBRN reconnaissance, recommendations on protective postures, and geofenced warnings. After incidents the system automatically compiles a ground truth base for recalibration of models and tracking of performance indicators.

Data quality is ensured by calibrations traceable to national standards, shift based field checks, automatic drift detection, and complete metadata. Each record stores coordinates with positioning accuracy, precise time, instrument state, uncertainty estimate, and operator identifier, and full data lineage is preserved for audit and legal reporting.

Reliability requirements include availability of key services of at least 0.995 over thirty days, sensor to display latency no more than five seconds for critical events, a steady state fused alert false alarm rate no more than one per system per day, mean time to repair frontline sensors no more than two hours, and graceful degradation based on a k out of n principle when channels fail. Communications must function under degraded and denied conditions with traffic prioritization and store and forward modes, interoperate with command systems and CBRN units through open secure data models and interfaces, and maintain time coherence across all nodes with holdover when satellite synchronization is lost.

Cybersecurity and anti spoofing are provided through mutual authentication and integrity checks for telemetry, algorithms for detecting synthetic spectra and artificial plumes, replay detection, and radio frequency monitoring for jamming indicators with automatic fallback to reserve modes. Human machine interfaces are tailored to the roles of commanders, staff, medics, and reconnaissance units, provide clear recommendations and uncertainty visualization, and simulator tools allow rehearsal of plume, sensor network, and communications scenarios to validate standard procedures. Compliance is maintained with national limits on permissible exposures, environmental reporting requirements, and principles of data minimization for medical streams.

In sum, the threat model and the set of quantitative and procedural requirements define the design envelope of the proposed architecture. The next section translates these requirements into a layered system with explicit data flows, time and reliability budgets, and integration rules for command processes.

IV. CONCEPTUAL ARCHITECTURE OF THE MILITARY ENVIRONMENTAL SECURITY SYSTEM

The proposed system is a layered, interoperable architecture that couples continuous monitoring with risk assessment and decision support across strategic, operational, and tactical echelons. Its purpose is to transform heterogeneous environmental signals into timely, actionable recommendations for commanders and specialized CBRN units while maintaining auditability, resilience, and legal compliance. Conceptually, the architecture follows a left-to-right flow from sensing to command action, and a top-to-bottom hierarchy from enterprise policy to frontline execution. For clarity, Fig. 1 depicts the components and principal data paths.

At the tactical edge the system employs a mixed sensor constellation. Fixed posts cover key facilities and training ranges to provide stable baselines and early warning. Mobile teams carry spectrometric and chemical detectors for hotspot confirmation and sampling under protective protocols. Unmanned aerial systems host wide-area payloads for plume mapping, source localization, and terrain-aware surveys. Vehicle-mounted opportunistic sensors extend coverage along patrol routes. Each device stamps measurements with time, position, instrument state, and uncertainty, then publishes compact records through a gateway. Local edge processors perform quality checks, calibration drift tests, spectral classification, and first-pass anomaly detection to reduce noise and bandwidth demand.

Communications form the second layer. The network supports prioritized telemetry and control channels over a mix of radios, cellular links, and line-of-sight relays. Store-and-forward modes preserve continuity during outages. Time synchronization is maintained with GNSS and disciplined holdover to keep clocks aligned when satellites are denied. Traffic shaping ensures that critical alerts preempt routine data, and encryption with mutual authentication protects integrity and origin of messages.

The data management layer ingests validated records into a streaming bus that feeds two stores. A hot store keeps recent telemetry in memory for sub-minute queries and dashboards. A durable store maintains versioned measurements, calibration metadata, and provenance for audit and training of models. Data lineage is preserved end to end so that any visualized map, metric, or decision recommendation can be traced back to raw observations and instrument states. This layer also houses schemas and open interfaces that allow exchange with command-

and-control systems, medical surveillance, and public environmental authorities when coordination is required.

Analytics and modeling provide the computational heart of the system. Stream processors fuse multi-source observations, estimate background fields, and compute confidence intervals. Dispersion engines run in two modes. In streaming mode they update predicted concentration and dose contours at fixed intervals using the latest meteorological nowcasts. In on-demand mode they execute what-if analyses for candidate countermeasures such as evacuation routes, sheltering policies, or reconnaissance tasking. Source term estimation reconciles model predictions with field readings to reduce bias. The analytics tier produces risk indicators that align with operational thresholds defined in the threat model and emits machine-readable recommendations.

Decision support bridges analytics with the command process. A rules and optimization service translates risk indicators into proposed actions for each role. Commanders receive a concise summary of the situation, uncertainty bounds, and a set of recommended measures that include protective posture, route adjustments, tasking of reconnaissance assets, and geofenced warnings. Reconnaissance teams receive targeted waypoints with expected information gain and safe approach corridors that account for wind, terrain, and current exposure. Medical staff receive projected casualty envelopes and triage guidance synchronized with logistics constraints. All recommendations are timestamped, versioned, and reversible, which allows after-action review and incremental learning.

Human-machine interfaces are role-tailored yet share a common operational picture. The main view displays contours of predicted and observed contamination, confidence bands, sensor health, and communications status. A timeline shows the detect-to-act chain with clock budgets for each stage so that staff can immediately see where delays occur. Drill-down panels reveal spectra, calibration checks, and raw counts for expert verification. A training mode replays historical incidents and simulated scenarios to rehearse procedures and validate standard operating protocols without touching the live system.

Reliability and resilience are engineered into each tier. The edge layer supports k-out-of-n coverage so that loss of individual sensors reduces precision but does not blind the system. Communications fail gracefully with automatic switchover to reserve links and deferred delivery during blackouts. Core services are deployed in redundant clusters with health checks and rolling updates to maintain availability targets. Every component exports metrics for latency, loss, and false alarm rates so that the system can enforce service level objectives in real time.

Cybersecurity is treated as a continuous process rather than a perimeter feature. All telemetry is signed and checked for integrity. Behavioral analytics flag spoofed spectra, synthetic plumes, and replayed packets. Radio frequency monitors detect jamming and geolocation degradation, triggering fallbacks such as inertial dead reckoning for time and position. Access controls follow least privilege, and all administrative actions are recorded for accountability.

Governance completes the architecture. A policy service encodes exposure limits, reporting rules, and sharing agreements so that the system can automatically enforce national standards and produce legally admissible records. Model management supports versioning, validation, and rollback of analytical components. After each incident or exercise, the learning pipeline absorbs ground truth, recalibrates models, and updates thresholds to improve performance over time.

In practical terms the architecture turns environmental security from a collection of tools into an integrated capability. Sensors feed trustworthy data, communications carry it with priority and protection, data services preserve its lineage, analytics convert it into risk-aware predictions, and decision support aligns recommended actions with command intent. Fig. 1 summarizes these relationships and the clock budgets between stages, preparing the ground for the methods and implementation details presented in the next section.

VI. UNIFIED CONCEPT AND REQUIREMENTS FOR THE ENVIRONMENTAL SECURITY SYSTEM

Environmental security in the armed forces should be treated as a cross-cutting operational function that reduces risks to personnel, civilians, weapons and infrastructure, while minimizing long-term damage to ecosystems. The key threats arise from radiation and chemical scenarios of both intentional and technogenic origin. They manifest in peacetime at training ranges and garrisons, during deployment and maneuver, in urban environments, and when dual-use facilities are struck. Primary exposure pathways include inhalation, ingestion, dermal contact, and external irradiation. Meteorology, terrain, and urban morphology shape dispersion and dose, which requires locally adaptive monitoring and modeling. An adversary may conceal sources, spoof sensor data, and disrupt navigation and radio communications. Therefore, the system must provide resilience, traceability of measurements, and verifiability of decisions.

Table I. Risk Matrix for Radiological and Chemical Events (with recommended actions)

Probability \ Severity	S1 (Minor)	S2 (Moderate)	S3 (Serious)	S4 (Severe)	S5 (Critical)
P1 (Rare)	Monitor background; log	Increase sampling; verify calibration	Task recon team; prepare shelter-in-place	Temporary movement restrictions	Immediate C2 notification; pre-alert medical
P2 (Unlikely)	Monitor & trend	Local warning; check meteorology	UAS recon; confirm source term	Shelter-in-place; reroute logistics	Raise protective posture; standby decon
P3 (Possible)	Heightened monitoring	Local cordon; sensor QC	Evacuate non-essentials; start modeling	Task CBRN recon; increase PPE level	Partial evacuation; prepare medical triage
P4 (Likely)	Issue local warning	Shelter-in-place	Route changes; establish ICP	Evacuation sectors; geofenced alerts	Full response; decon corridors; medical surge
P5 (Almost certain)	Trend review & audit	Immediate cordon	Rapid source localization	Deploy countermeasures	Maximum protective posture; interagency coordination

Current practice shows gaps caused by fragmented sensing channels, heterogeneous data quality, manual handoffs between measurement, modeling, and command actions, as well as uneven attention to cyber threats. To close these gaps, environmental security should be designed as a multilayer system that integrates observation, risk assessment, and decision support at strategic, operational, and tactical levels. At the tactical edge, fixed posts, mobile teams, and unmanned aerial payloads operate as complementary assets. Up front, field checks, calibration-drift detection, first-pass spectral classification, and anomaly filtering are performed. Communications provide prioritization of critical telemetry, encryption, and store-and-forward modes for intermittent links. The stream of validated records enters a fast analytics memory tier and a durable repository with preserved provenance, which enables reproduction of any contamination maps and command recommendations.

The analytics loop fuses heterogeneous observations, estimates background fields, runs transport calculations, and produces forecast contours with regular updates, as well as scenario analysis for countermeasure selection. The decision service converts risk indicators into concrete actions for commanders, reconnaissance units, and medical staff. Commanders receive concise summaries with uncertainty bounds and recommended measures; reconnaissance receives routes with expected information gain and safe corridors; medical personnel receive estimates of potential casualties and triage guidance. Interfaces share a common operational picture and allow drill-down to raw spectra and instrument status. Reliability is ensured by component redundancy, target availability levels, and k-out-of-n degradation when sensors or links fail. Cybersecurity is implemented through mutual authentication, integrity control, behavioral analytics for spoofing indicators, and radio monitoring for jamming.

The system is oriented toward measurable goals. Time to a credible alarm is cut to the order of minutes, the interval from alarm to recommended action fits within five minutes, and the common operating picture refreshes up to once per minute. For radiation and chemical hazards, controlled thresholds are set for sensitivity, source-localization accuracy, and contour forecast error. After incidents and exercises, a ground-truth corpus is compiled to retrain models and refine thresholds, closing the loop for continuous improvement.

In this way the concept transforms environmental security from a set of disparate tools into an integrated risk-management capability. The combination of trustworthy measurements, protected and prioritized communications, governed analytics, and disciplined decision-making reduces exposure, avoids false alarms, conserves resources, and diminishes both sanitary and ecological harm while preserving legal admissibility of records and interagency interoperability.

VII.CONCLUSION

This work frames environmental security for the armed forces as an integrated, mission-enabling capability rather than a loose collection of tools. We synthesized the threat landscape for radiation and chemical hazards, specified quantitative detection and response targets, and articulated a layered architecture that links sensing, secure communications, governed data management, streaming analytics, and role-tailored decision support. In doing so, the approach compresses the detect-to-act timeline, reduces uncertainty, and improves protection of personnel, civilians, and ecosystems while maintaining legal traceability and interoperability with command systems. The consolidated concept emphasizes measurable performance (sensitivity, localization accuracy, forecast error, alert latency) and continuous learning through after-action truth capture. Limitations include dependence on communications resilience, model fidelity under rapidly changing meteorology, and the need for rigorous cyber hardening and operator training. Future work should validate the architecture in field exercises with contested electromagnetic conditions, refine source-term estimation and uncertainty quantification, and develop doctrine and KPIs for operational integration across strategic, operational, and tactical echelons. Implemented systematically, the proposed system turns environmental risk management into a repeatable, auditable core function of military readiness.

REFERENCES

[1] R. Akhundov, “Modern developments in the field of weapons of mass destruction and defence against them,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 132–133, 2024.

[2] R. Q. Axundov, “Azərbaycan Ordusunda radiasiya, kimyəvi və bioloji kəşfiyyatın xüsusiyətləri,” in 4-cü Sənaye İnqilabı və İqtisadiyyatın Rəqəmsallaşdırılması: Beynəlxalq Elmi Konfransın Materialları, pp. 104–108, 2023.

[3] R. Q. Axundov, “Azərbaycan Ordusunda ekoloji təhlükəsizliyin təşkili və təkmilləşdirilməsi,” Hərbi Bilik, no. 4, pp. 7–15, 2024.

[4] S. Babayev et al., “Prospects for the application of nanotechnology in the military sector,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 14–15, 2024.

[5] R. Akhundov and I. Islamov, “Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments,” Матеріали конференцій МЦНД, (30.05.2025; Київ, Україна), pp. 321–329, 2025.

[6] R. Akhundov and I. Islam, “Ensuring environmental safety in military activities considering radiological and chemical protection,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (May 23, 2025; New York, USA), pp. 175–182, 2025.

[7] E. V. Mammadov et al., “Development of multilayered protection systems against chemical, radiological, and biological hazards for military personnel,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 112–113, 2025.

[8] R. Akhundov, “Establishing a global system for radiation and chemical security monitoring: importance and opportunities for international cooperation,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (July 4, 2025; Zurich, Switzerland), pp. 121–127, 2025.

[9] A. H. Hasanov et al., “Scientific and technological progress or environmental safety,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 22–23, 2024.

[10] R. G. Akhundov and E. A. Eldarov, “Special operations forces in modern conflicts,” Вестник науки и образования, no. 6(149), pp. 16–20, 2024.

[11] R. Akhundov, “The environmental impact of military activities,” ResearchGet, 2024. [Online]. Available: ResearchGet. [Accessed: Oct. 4, 2025].

[12] R. Akhundov and I. Islamov, “Innovative technologies for radiation and chemical protection in the armed forces,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (June 6, 2025; Bologna, Italy), pp. 247–255, 2025.

[13] R. Akhundov and I. Islamov, “Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments,” Матеріали конференцій МЦНД, (30.05.2025; Київ, Україна), pp. 321–329, 2025.

[14] R. G. Akhundov and A. M. Talibov, “Environmental safety as a component of national security,” in The Latest Technologies – for the Protection of Airspace: Abstracts of the 20th Int. Sci. Conf. of Kharkiv National University of the Air Force Named After Ivan Kozhedub, Kharkiv, Ukraine, May 2–3, 2024, pp. 25–27.

[15] Р. Г. О. Ахундов, “Построение экспериментальных изотерм адсорбции образцами угленаполненного химзащитного субстрата,” Наука, техника и образование, no. 10(63), pp. 16–20, 2019.

[16] Р. Г. Ахундов, А. Г. Ахмедова, Ш. Д. Даньялов, и И. И. Мустафаев, “Радиационно-стимулированные процессы получения активного угля,” Санкт-Петербург, vol. 25, no. 1, p. 47, 2020.

[17] R. Akhundov and D. Sh., “The use of modified activated coal in sorption of carbon-monoxide,” in Materials of the Int. Sci.-Practical Conf. “Radiation and Chemical Safety Problems”, Baku, Nov. 2019, pp. 161–162.

[18] R. Akhundov, “Ecocide in the Nagorno-Karabakh conflict: an analysis of Armenia’s environmental impact on Azerbaijan,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools. Abstracts of the 14th Int. Sci. and Tech. Conf., Kharkiv, Ukraine, vol. 2, pp. 95–96, Apr. 2024.

[19] R. Akhundov and I. Islamov, “Operational modes of environmental security systems in the armed forces facing radiation and chemical threats,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (Aug. 22, 2025; Bern, Switzerland), pp. 103–111, 2025.

[20] R. Akhundov and I. Islamov, “Innovative technologies for enhancing environmental security in armed forces under radiation and chemical threats,” Матеріали конференцій МЦНД, (15.08.2025; Харків, Україна), pp. 141–150, 2025.

[21] R. Akhundov and I. Islamov, “Comprehensive approach to establishing operational modes of environmental security systems in military forces under radiation and chemical hazards,” Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (Aug. 8, 2025; Liverpool, UK), pp. 108–116, 2025.

[22] R. Akhundov, “Application of innovative technologies for the decontamination and neutralization of radiological and chemical hazards in military environments,” Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (Aug. 1, 2025; Seoul, South Korea), pp. 107–115, 2025. doi: 10.36074/logos-01.08.2025.017.

[23] R. Akhundov and I. Islamov, “Exploring the potential, challenges, and future of robots and autonomous systems in warfare,” Матеріали конференцій МЦНД, (18.07.2025; Тернопіль, Україна), pp. 117–126, 2025.

[24] R. Akhundov, “Advancements in monitoring radiation and chemical hazards for military environmental safety,” Матеріали конференцій МЦНД, (04.07.2025; Ужгород, Україна), pp. 89–97, 2025. doi: 10.62731/mcnd-04.07.2025.002.

[25] S. M. Babayev et al., “The impact of new technologies on the progress of military art,” in Proc. Int. Sci. and Practical Conf., vol. 6, pp. 54–56, 2024.

[26] A. Talibov et al., “Environmental safety of nanomaterials application,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 55–56, Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala, 2024.

[27] R. Akhundov and E. Hashimov, “The impact of new technologies on enhancing the efficiency of armed,” Матеріалы конференцій МЦНД (13.06.2025; Lutsk, Ukraine), pp. 186–195, 2025.

[28] R. Akhundov and E. Hashimov, “The environmental impact of war: Effects, challenges, and solutions,” Матеріали конференцій МЦНД (27.06.2025; Dnipro, Ukraine), pp. 103–112, 2025.

[29] A. M. Talibov et al., “The use of unmanned aerial vehicles for monitoring chemical and radiation contamination,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 4, pp. 88–89, 2025.

[30] A. M. Talibov et al., “Modeling and forecasting radiological and chemical threats in the military sphere,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 120–121, 2025.

[31] A. M. Talibov et al., “Application of biotechnology to mitigate the consequences of radiological and chemical contamination,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 86–87, 2025.

[32] A. R. Jabrayilov et al., “Development of a comprehensive environmental protection system for military facilities,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 4, pp. 82–83, 2025.

[33] A. Jabrayilov et al., “Digital technologies and artificial intelligence in the management of environmental safety in the army,” in Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools: Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 1, pp. 110–111, 2025.

[34] A. M. Talibov et al., “Training military personnel in radiation and chemical threat protection methods,” in Proc. 15th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 4, pp. 94–95, 2025.

[35] A. R. Jabrayilov et al., “Experience of international cooperation in the field of military environmental safety,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 116–117, 2025.

[36] A. R. Jabrayilov et al., “Prospects for creating closed ecological life support systems,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 4, pp. 92–93, 2025.

[37] A. R. Jabrayilov et al., “The role of environmental monitoring in ensuring the safety of military units,” Current Directions of Development of Information and Communication Technologies and Control Tools, vol. 1, pp. 128–129, 2025.

[38] A. Talibov et al., “The main anthropogenic sources of atmospheric pollution,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 53–54, Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala, 2024.

[39] R. Mammadov et al., “Enhancing special forces management efficiency in modern operations,” in Problems of Informatization: Proc. 12th Int. Sci. and Tech. Conf., vol. 3, pp. 31–32, 2024.

[40] I. Islamov et al, “Integrating environmental security into defense strategy with a focus on radiological and chemical risks,” Strategic directions of science development: Factors of influence and interaction: Collection of scientific papers with materials of the VII International Scientific Conference, Cherkasy, Ukraine, Sept. 26, 2025, pp. 115–125. doi: 10.62731/mcnd-26.09.2025.

MCIT Modeling, control & information technologies

Geoinformational support for modeling the efficiency of crop cultivation in crop rotations

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.130

Roman Shulgan
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
r.b.shulhan@nuwm.edu.ua

Oleksandr Yanchuk
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
o.e.yanchuk@nuwm.edu.ua

Kateryna Nikolaichuk
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
k.m.nikolaichuk@nuwm.edu.ua

Anastasiia Kibysh
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
kibysh_az21@nuwm.edu.ua

***Abstract* – In the article was developed a tool in the ModelBuilder application, which evaluate the economic efficiency of the use of the selected plot of land and provide an opportunity to determine the most effective scientifically based crop rotation using the modeling method. The indicator of effective use is the profitability of growing products, when applying different sets of agricultural crops scientifically based crop rotation. The model was tested on a specific field of an agricultural enterprise with different crop rotation options, as well as when applying the same crop scheme for different fields.**

Keywords – yield; price of ball-bonitet; ModelBuilder; profitability

I. Introduction (Heading 1)

Fulfilling of the needs of the population in food products, branches of consumer industry in agricultural raw materials requires an increase in the production of agricultural products on the basis of rational and efficient use of land. The practice of management in market conditions confirms the indisputable truth that the effectiveness and efficiency of agricultural enterprises primarily depends on the effective use of land [5].

The issues of yield forecasting and optimization of plant cultivation are addressed in their works by G.I.Yarovy, O.V. Romanov, N.O. Didukh, T.A. Romanova. The task of crop programming is the theoretical justification and practical implementation of the possible level of use of solar energy, soil and climatic resources, genetic potential of zoned and promising varieties to obtain high crop yields with minimal material, monetary and energy costs [7].

Crop rotation modeling based on satellite data was the focus of the work of F´elix Quinton, Loic Landrieu Lastig. They take advantage of the increasing quantity of annotated satellite data to propose the first deep learning approach modeling simultaneously the inter- and intra-annual agricultural dynamics of parcel classification [4].

Crop rotation is a critical management strategy available to farmers to sustain soil fertility, combat pests, and improve crop yields. Because of the complex feedbacks occurring in the soil-plant-atmosphere continuum, legacy effects and their interactions with climate are generally not well understood, and their ultimate influence on yields and environmental quality is difficult to predict. Crop simulation models offer a way of parsing through this complexity [1].

Increasing the efficiency of land use is due to the use of modern technologies and means of management, planning and monitoring of agricultural activity. An example can be the work [6], where the concept of a tool for constructing a cartogram of ecological and economic suitability of lands in an automated mode using the ArcGIS software product is presented and implemented. The next stage, after identifying the most suitable areas for growing agricultural crops, is the design of scientifically grounded crop rotations on these areas, the main objective of which is to ensure the profitability of the agricultural enterprise while maintaining the ecological condition of the territory.

That is why the purpose of this work is to develop a tool in the ModelBuilder application [8] for mathematical modeling of crop yield and profitability assessment, which will allow for the formation of the most efficient and rational crop rotations. The purpose of this research is to develop a model of crop cultivation efficiency in crop rotation fields, which will allow automated configuration of the most efficient placement of crops.

II. Method and/or Theory

To achieve the objective of crop rotation planning, it is necessary to develop a tool within the ModelBuilder environment that would evaluate the economic efficiency of the selected land plot and provide the ability to determine the most effective, scientifically

grounded crop rotation using a modeling approach.The tool should be based on a mathematical model for predicting yields, which will allow for fairly accurate calculation of yields depending on the location of crop rotation fields and soil properties.

Based on the analysis of literary sources, a mathematical model was selected, according to which the value of the predicted harvest based on the price of the ball-bonitet is determined depending on [2]:

$$H_{pr} = \frac{(B \cdot P + D_m \cdot P_m \cdot C_o) \cdot C_p \cdot C_{wat}}{100}, \quad (1)$$

where B – ball-bonitet of the soil; P – ball-bonitet price by crop yield kg/ball; Dm – dose of applied mineral fertilizers (full mineral nutrition), kg of active substance/ha; Pm – payback of mineral fertilizers by yield increase, c/c; Co – correction factor for the direct effect and after the effect of organic fertilizers; Cwat – correction factor for the technical level of water regulation; Cp – correction factor for production conditions.

For modeling, we consider the situation when we calculate the yield without applying organic fertilizers (at the same time Co=1,0), coefficients for production conditions and the technical level of water regulation are equal to 1.0. Based on this, the formula will have the following form:

$$H_{pr} = \frac{B \cdot P + D_m \cdot P_m}{100} \quad (2)$$

This formula will allow you to calculate the forecast yield of an agricultural crop, taking into account the dose of mineral fertilizers applied to soils with the corresponding credit scores. The prices of credit points for agricultural crops grown on the territory of Ukraine are obtained from the work of O.M. Kovalova [3]. The cost of growing agricultural crops per 1 ha and their prices were taken from specialized sites.

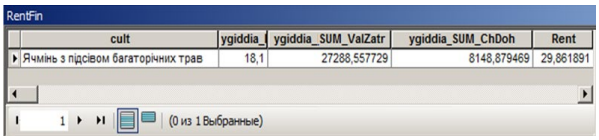
Thus, the following input data are required for the model to work:

- layer with boundaries of agro groups of soils, containing data about ball-bonitet of arable land on a specific agricultural group;
- a layer that contains data on the dose of fertilizers that is planned to be applied;
- layer with land boundaries and their name;
- a layer containing a list of crops that can be grown in the area, their ball-bonitet prices, selling prices, and cultivation costs excluding fertilizers
- a layer containing a list of crops that can be grown in the area, their ball-bonitet prices, selling prices, and cultivation costs excluding fertilizers.

Based on the initial data described above, a model of the efficiency of growing agricultural crops was developed depending on profitability.

The result of the developed model for automated assessment of the efficiency of growing certain crops in a particular field is the following table (Fig. 1). As you can see from the figure, this table is not convenient to use, so there was a need to develop a template that would format the final result of the model in the form of a report for convenience and clarity.

The next step is to customize and edit the report's appearance. To automate the generation of the final table, which is obtained from the model in the form of a customized report, we will use the file with the template of the report.


RentFin

cult	ygiddia_(	ygiddia_SUM_ValZatr	ygiddia_SUM_ChDoh	Rent
Ячмінь з підсівом багаторічних трав	18,1	27288,557729	8148,879469	29,861891

1 (0 из 1 Выбранные)

Figure 1. The result of the developed model

III. Results

For an example of the application of the model, let's use the set of crops most widespread for the studied area: perennial grasses for green fodder, winter wheat, sugar beet, corn for grain, peas, barley with sub sowing of perennial grasses. It will form the 8th complete crop rotation, which will be implemented on the territory of the agricultural enterprise, which is located within the Zdolbuniv territorial community of the Rivne region.

To demonstrate the work of the model, we will apply it to two 8-field crop rotations, where the set of cultivated crops for the same field will differ, and we will also present the corresponding reports. At the first stage, we choose the dose of mineral fertilizers.

Further, by means of GIS analysis, we establish agricultural production groups of soils for the selected field and their area and credit score. The next step is the automatic calculation of the cost of mineral fertilizers that will be used for the selected field. At the next stage, we select agricultural crops that are planned to be grown on the selected field for the 8-year crop rotation. Next, for each of the selected crops, formula (2) automatically calculates the forecast yield, taking into account the applied mineral fertilizers.

Gross costs for each of the crops are calculated according to the formula (3):

$$G_i = \sum H_i * P_i * L_a, \quad (3)$$

where Hi – yield of the i-th agricultural crop, c/ha; Pi – price for the i-th product, hryvnias/c; La – land area, ha.

The net income from growing each crop is calculated automatically by formula (4):

$$N_i = G_i - C_p, \quad (4)$$

where Ni – net income from the plot, hryvnias; Gi – gross income of the plot, hryvnias; Cp – costs for the production of products, hryvnias.

The next step is to calculate the total values of gross costs and net income for the cultivation of agricultural crops on all agro groups of soils that are on the selected plot of land, and for yield, the average value for the field is calculated.

Next, from the obtained values of gross costs and net income, we calculate the profitability of growing this

agricultural crop on the selected field according to formula (5).

$$P_p = \frac{N_i}{C_p} \times 100\% \ , \qquad (5)$$

where Pp – profitability of production, %.

For the convenience of presenting the results, a report is generated that contains data on the effectiveness of the modeled crop rotation. Analyzing the reports, we can see that the profitability of the first set is 17.6%, and the second set is 33.2%, i.e., the profitability is lower when growing the first set of crops (Fig. 2). Therefore, the second set is more cost-effective to grow on the selected field. Similarly, the user of this model can experimentally select the optimal site for growing a particular set of crops in a crop rotation.

Agricultural crops for for growing in the 8-year	**Sugar beet**
Average yield of agricultural crop, c/ha	118.8
Total gross costs for growing agricultural crop, hryvnias	44686
Net income from the growing agricultural crop, hryvnias	-16230
Profitability of the growing agricultural crop, %	-36.3

As a whole for the selected field:	
Area of the field, ha	**34**
Dose of applied mineral fertilizers kg/ha	**100**
The cost of applied fertilizers	**40832**
Total gross costs for growing agricultural crops of the selected crop rotation, hryvnias	**246425**
Net income from the growing agricultural crops of the selected crop rotation, hryvnias	**43323**
Profitability of the growing agricultural crops, of the selected crop rotation %	**17.6**

Agricultural crops for for growing in the 8-year	**corn for grain**
Average yield of agricultural crop, c/ha	28.8
Total gross costs for growing agricultural crop, hryvnias	32393
Net income from the growing agricultural crop, hryvnias	18255
Profitability of the growing agricultural crop, %	56.4

As a whole for the selected field:	
Area of the field, ha	**34**
Dose of applied mineral fertilizers kg/ha	**100**
The cost of applied fertilizers	**40832**
Total gross costs for growing agricultural crops of the selected crop rotation, hryvnias	**234132**
Net income from the growing agricultural crops of the selected crop rotation, hryvnias	**77809**
Profitability of the growing agricultural crops, of the selected crop rotation %	**33.2**

Figure 2. Report fragment for the first and second sets of crops

CONCLUSIONS

Therefore, in this work, a tool was developed that allows mathematically modelling the yield of crops and choosing the most effective crop rotations. The indicator of effective use is the profitability of crop production when applying different sets of agricultural crops within a scientifically grounded crop rotation.

The model was tested on a specific field of an agricultural enterprise with different crop rotation options, as well as when applying the same crop scheme for different fields. The developed model will allow you to automatically calculate the profitability of growing crops in crop rotation fields and, accordingly, configure the most efficient placement of crops.

REFERENCES

[1] Basso, B., Martinez-Feria, R., & Dumont, B. Modeling crop rotations: capturing short- and long-term feedbacks for sustainability and soil health. Advances in crop modelling for a sustainable agriculture, 2019, pp. 217-238. https://doi.org/10.19103/AS.2019.0061.11

[2] Kharchenko, O.V. Fundamentals of crop yield programming. Sumy, 2003, 296 p. (in Ukrainian).

[3] Kovalova, O.M. Economic evaluation of agricultural land taking into account social and environmental factors. Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Economic Sciences. Sumy, 2002, 241 p. (in Ukrainian).

[4] Quinton, F., Landrieu, L. Crop rotation modeling for deep learning-based parcel classification from satellite time series. Remote Sensing, 13(22), 4599, 2021. https://doi.org/10.3390/rs13224599

[5] Rohach, S.M., Hutsul, T.A., Tkachuk, V.A. at al. Economics and entrepreneur ship, management. Kyiv: CPU "Comprint", 2018, 722 p. (in Ukrainian).

[6] Shulgan, R., Yanchuk, O., Kibukevich, O. Automation of building a cartogram for ecological and economic feasibility of the lands with the agricultural determination. Geodesy and Cartography, 46(1), 2020, pp. 17-25. https://doi.org/10.3846/gac.2020.9811

[7] Yarovyy, H.I., Romanov, O.V., Didukh, N.O., Romanova, T.A. Yield programming. Kharkiv: KHNAU, 2020, 75 p. (in Ukrainian).

[8] What is ModelBuilder? ArcGIS Pro. Retrieved August 28, 2025, from http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm

Геоінформаційні аспекти планування заходів адаптації до змін клімату в малих містах України (на прикладі м. Острог)

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.131

Тетяна Басюк
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
t.o.basyuk@nuwm.edu.ua

Василь Корбутяк
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
v.m.korbutiak@nuwm.edu.ua

Андрій Федорчук
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
fedorchuk_vg20@nuwm.edu.ua

***Анотація* — У статті розглянуто комплексний підхід до оцінки вразливості малого міста Острог до основних кліматичних викликів – теплового стресу та підтоплень. На основі аналізу просторового розподілу забудови, зелених насаджень, рельєфу та температурних даних виявлено найкритичніші ділянки міста. Запропоновано низку конкретних адаптаційних заходів, зокрема впровадження «зелених дахів» та створення «зелених островів», спрямованих на пом'якшення негативних наслідків кліматичних змін. Наголошується на важливості моніторингу ефективності впроваджуваних рішень з використанням сучасних геопросторових методів.**

Ключові слова — *тепловий стрес, підтоплення, міське середовище, зелена інфраструктура, просторове планування.*

I. Вступ

Сучасний етап розвитку урбанізованих територій України, що відбувається в умовах посилення кліматичних змін та складних соціально-економічних викликів, вимагає фундаментального переосмислення підходів до містобудування. Інтеграція принципів кліматичної стійкості в системи міського планування перетворюється з абстрактної концепції на практичну необхідність. Особливо це стосується малих міст, які, з одного боку, мають обмежені ресурси для розробки та впровадження складних стратегій адаптації, а з іншого – часто є найбільш вразливими через морально та фізично застарілу інженерну та соціальну інфраструктуру, а також недостатність функціональних зелених зон [1; 5].

Місто Острог, що має багату історичну спадщину, є типовими представником малих обласних центрів України, які стикаються із загрозами, пов'язаними із посиленням екстремальних погодних явищ. Актуальність даного дослідження полягає у поєднанні класичних підходів фізико-географічного аналізу з сучасними методами обробки просторової інформації для отримання конкретних, практично-орієнтованих результатів, придатних для негайного впровадження органами місцевого самоврядування. Таке поєднання дозволяє перейти від загальних міркувань до цілеспрямованого планування втручань на конкретних територіях. [2–4].

Метою роботи є комплексна оцінка просторової диференціації вразливості м. Острог до двох ключових кліматичних викликів – теплового стресу та підтоплень – та розробка на цій основі науково обґрунтованих пропозицій щодо конкретних адаптаційних заходів, інтегрованих у міський простір.

II. Методика дослідження

Методологічну основу дослідження становить системний підхід, що базується на комплексному аналізі гетерогенних просторових даних. Для досягнення поставленої мети було застосовано низку взаємопов'язаних методів.

Для оцінки ризику підтоплень основним інструментом було гідрологічне моделювання. Вихідною базою для нього була цифрова модель рельєфу (ЦМР), побудована на основі даних місії SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) з просторовою роздільною здатністю 30 метрів. Для забезпечення коректності подальших розрахунків проведено попередню обробку ЦМР з метою усунення локальних помилкових западин (sinks), що дозволило відтворити реальні умови поверхневого стоку.

Для аналізу теплового навантаження на міське середовище було застосовано двоступеневий підхід:

1. Аналіз багаторічної динаміки температури повітря. Використано ряди даних найближчої до Острога метеостанції м. Рівне за період 1990-2024 рр. Було розраховано середньолітні температури (червень-серпень) для кожного року.

2. Оцінка температури поверхні землі (LST). Для виявлення просторової структури «міського острова тепла» виконано розрахунок LST на основі даних теплового каналу (Band 10) супутника Landsat 8.

Окрім того, для оцінки антропогенної трансформації території проведено порівняльний аналіз динаміки забудови та зелених насаджень за період 2002-2018 рр. на основі архівних супутникових знімків високої роздільної здатності.

III. Основні результати дослідження

Аналіз багаторічних метеоспостережень (1990-2024 рр.) виявив сталу тенденцію до потепління в регіоні (рис. 1). Встановлено, що середня літня температура повітря суттєво зростає, починаючи з 1990-х років. Якщо на початку періоду спостережень значення коливалися в межах 16-17°C, то після 2010 року вони стабілізувалися на рівні 19-20°C, із періодичними піками понад 21°C. Ця динаміка є індикатором зростаючого теплового навантаження на міську інфраструктуру та здоров'я населення.

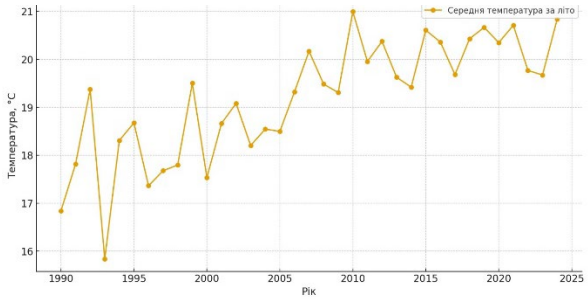


Рис. 1. Динаміка середньої літньої температури (червень-серпень) по роках за даними метеостанції м. Рівне

Оцінка ризиків підтоплень на основі моделювання поверхневого стоку. Результати моделювання поверхневого стоку виявили чітку просторову диференціацію території міста за рівнем гідрологічного ризику. Як видно на рис. 2, центральна частина м. Острог є зоною концентрації водних потоків та потенційної аккумуляції води.

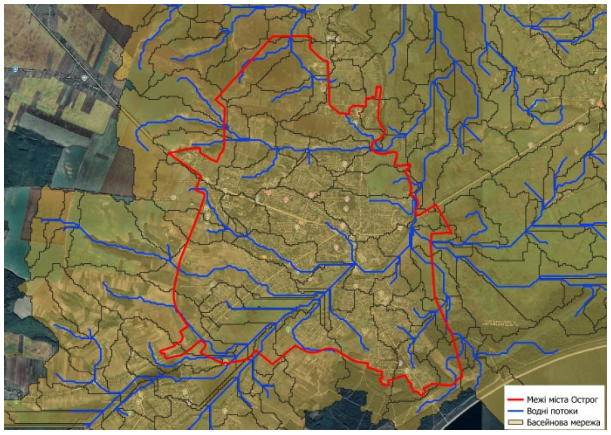


Рис. 2. Мережа водних потоків на території м. Острог

Генезис даного явища має комплексний характер і обумовлений поєднанням низьких абсолютних відміток рельєфу, що формують природну депресію; високої частки водонепроникних поверхонь; та недостатньої пропускної спроможності існуючих інженерних систем водовідведення. Детальна карта основних водних потоків (рис. 3) підтверджує, що саме центральні райони міста, зокрема вздовж Проспекту Незалежності та суміжних вулиць (Гальшки Острозької, Соборної), є найбільш вразливими до підтоплень під час інтенсивних зливових опадів.

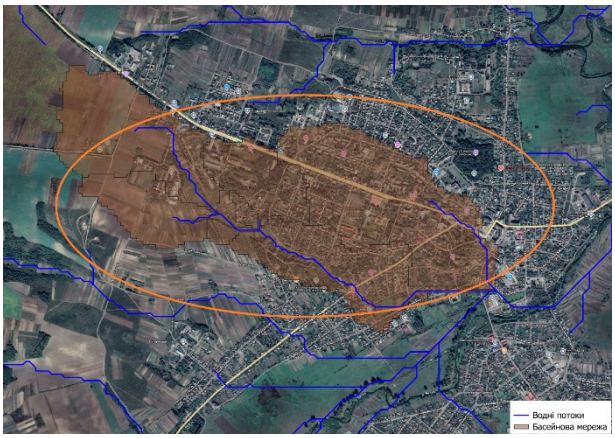


Рис. 3. Основні водні потоки в межах м. Острог

Результати розрахунків температури поверхні землі (LST) наочно демонструють формування інтенсивного «міського острова тепла». Як видно на рис. 3, максимальні значення LST, що досягають 35–36°C, фіксуються в центральній частині міста. Контраст між нагрітими урбанізованими територіями та прохолоднішими периферійними ділянками, вкритими рослинністю, становить 3-5°C.

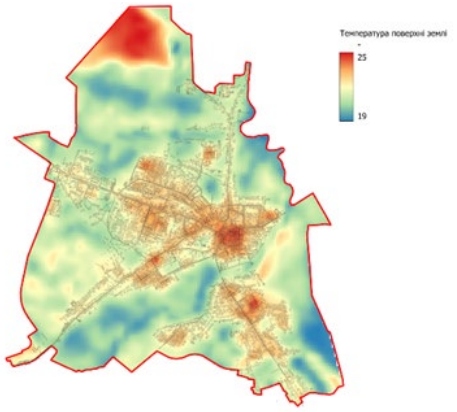


Рис. 3. Температури поверхні землі на території м. Острог за даними Landsat 8 (серпень 2025 р.)

Детальний аналіз центру міста (рис. 4) підтверджує, що ядро теплового острова збігається з районами найщільнішої забудови, мінімальною часткою зелених насаджень та максимальною часткою асфальтобетонних покриттів. Порівняльний аналіз з історичними супутниковими знімками остаточно підтверджує, що процес урбаністичного ущільнення виступив ключовим фактором посилення даного ефекту.

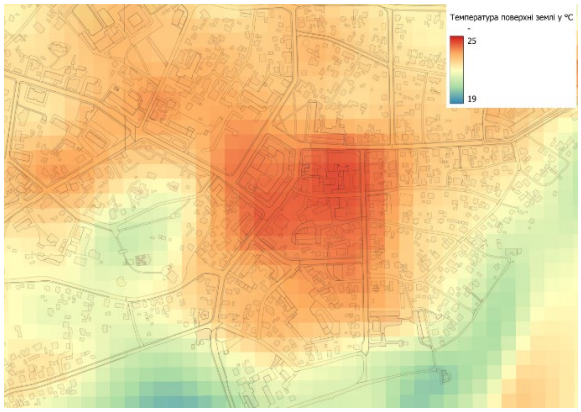


Рис. 4. Температура поверхні землі у центрі міста Острог

Порівняльний аналіз архівних знімків наочно ілюструє інтенсифікацію антропогенного навантаження. На рис. 5 та рис. 6 представлена динаміка центральної частини міста між 2002 та 2018 роками, що свідчить про ущільнення існуючої забудови, зменшення внутрішньодворових зелених зон та зростання площ водонепроникних поверхонь.



Рис. 5. Центральна частина м. Острог, 2002 рік



Рис. 6. Центральна частина м. Острог, 2018 рік

Ще більш виразна трансформація спостерігається в районі житлового комплексу «Карпатський». Як видно з рис. 7 та рис. 8, на місці порівняно вільної забудови у 2002 році до 2018 року сформувався щільний багатоповерховий масив, що супроводжувався радикальним збільшенням теплової інерції даної території та різким зростанням обсягів поверхневого стоку.



Рис. 7. Район ЖК «Карпатський», 2002 рік



Рис. 8. Район ЖК «Карпатський», 2018 рік

На основі отриманих результатів комплексного просторового аналізу було розроблено цілісну систему адаптаційних заходів, спрямованих на пом'якшення негативних наслідків кліматичних змін для міського середовища Острога. Запропоновані рішення ґрунтуються на принципах природоорієнтованого підходу та концепції "міста-губки" і включають кілька взаємопов'язаних напрямів, що формують єдиний механізм підвищення кліматичної стійкості міста.

1. Озеленення дахів як спосіб контролю міського теплового навантаження. Аналіз розподілу температури поверхні землі виявив критичну роль забудови у формуванні міського теплового острова. Для зниження теплового навантаження від ключових будівель-«донорів» тепла запропоновано систему "зелених дахів". Відбір об'єктів для пріоритетного впровадження проводився за сукупністю критеріїв, що включають площу покрівлі, розташування в зонах з найвищими значеннями температури поверхні, функціональне призначення та концентрацію населення в прилеглих територіях.

У центральній частині міста ідентифіковано ключові об'єкти, пріоритетні для впровадження «зелених дахів». До них віднесено універмаг та торговий центр «Ritches» – як об'єкти з максимальною площею покрівель та розташуванням в епіцентрі теплового острова; корпуси Національного університету «Острозька академія» - через їх соціальну значущість та концентрацію молоді; багатоповерхові житлові будинки по вул. Яворницького та просп. Незалежності - як місця постійного проживання значної кількості мешканців.

Для кожного з цих об'єктів розрахований потенційний ефект від впровадження, який включає зниження температури покрівлі на 15-25°C влітку, скорочення поверхневого стоку на 50-70% від випавших опадів, покращення якості повітря за рахунок фільтрації пилу та поглинання CO_2, а також збільшення біорізноманіття в урбанізованому середовищі.

2. Створення мережі «зелених островів» для комплексного адаптаційного впливу. Другим ключовим елементом адаптаційної стратегії є створення розподіленої мережі «зелених островів» - невеликих озеленених зон, інтегрованих у щільну міську забудову. Ці елементи виконують подвійну функцію, що поєднує терморегулюючі та водоакумулюючі властивості.

Терморегулююча функція реалізується через створення тіньових коридорів для пішохідних маршрутів, зниження температури повітря шляхом евапотранспірації на 2-4°C та формування мікрокліматичних осередків комфорту в найбільш нагрітих зонах. Водоакумулююча функція включає затримання та інфільтрацію дощових вод, зниження пікового навантаження на зливову мережу на 20-30% та поповнення грунтових вод.

Оптимальні локації для «зелених островів» обрані на основі комплексного аналізу шляхів основних водних потоків, зон максимальної щільності населення, найбільш нагрітих ділянок та відстані до існуючих зелених зон для створення єдиної екологічної мережі. Критичними точками для впровадження визначені перехрестя вулиць Замкова - Федорова, перехрестя Проспекту Незалежності - Татарська, перехрестя Гальшки Острозької - Проспект Незалежності, а також подвір'я нового корпусу Острозької академії.

3. Адаптація інших проблемних районів міста.

Для району ліцею №1 - Острозької академії - Майдану Свободи запропоновано аналогічний підхід. Ідентифіковано ключові будівлі для «зелених дахів»: ліцей №1; корпус Острозької академії; будівля Укрпошти; пологовий будинок. Розміщення «зелених островів» на Майдані Свободи та прилеглих перехрестях дозволить не лише покращити мікроклімат цього району, але й частково акумулювати дощові води, що стікають у нижні частини міста.

Для житлового комплексу «Карпатський», що характеризується надзвичайно високою щільністю нової забудови, запропоновано комплекс заходів, що включає озеленення дахів двох основних будівель житлового комплексу, створення двох «зелених островів» у центрі кварталу та заміну асфальтових покриттів внутрішньодворових територій на водопроникні матеріали.

Запропонована система заходів створює значний синергетичний ефект: «зелені дахи» знижують теплове навантаження на рівні окремих будівель, тоді як «зелені острови» формують мережу мікрокліматичних осередків на рівні міських просторів. Разом вони значно знижують інтенсивність теплового острова та ризики підтоплень, створюючи самопідтримувану систему кліматичної адаптації.

Економічна ефективність впровадження включає скорочення витрат на кондиціювання приміщень на 15-20%, зменшення витрат на ремонт зливової інфраструктури, підвищення інвестиційної привабливості територій та зростання вартості нерухомості в районах з покращеним мікрокліматом. Додатковим економічним ефектом є збільшення туристичної привабливості міста через покращення якості міського середовища.

Реалізація запропонованих заходів дозволить перетворити Острог на модель кліматично стійкого малого міста, адаптованого до сучасних викликів, зі збереженням його історичної спадщини та покращенням якості життя мешканців. Системний підхід до планування дозволяє поєднати екологічну ефективність з економічною доцільністю, що робить запропоновані рішення практично реалізованими в умовах обмежених бюджетних ресурсів малих міст.

IV. ВИСНОВКИ

Комплексний просторовий аналіз дозволив ідентифікувати та ранжувати зони підвищеної вразливості м. Острог до ключових кліматичних ризиків. Встановлено, що найкритичнішими є центральні райони міста, що характеризуються щільною забудовою, високою часткою водонепроникних поверхонь та низькими відмітками рельєфу.

На основі отриманих даних розроблено конкретний, просторово-прив'язаний план адаптаційних заходів. Його ядро становить комбінація впровадження «зелених дахів» на ключових будівлях та створення мережі дрібних «зелених островів». Для забезпечення наукової обґрунтованості управлінських рішень запропоновано систему моніторингу ефективності впровадження заходів, що базується на супутникових даних.

Представлений у роботі підхід може бути успішно адаптований для інших малих та середніх міст України, сприяючи формуванню єдиної, науково обґрунтованої державної політики в галузі кліматичної адаптації.

Література

[1] Зацерковний. В. І. Геоінформаційні системи в науках про Землю Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2016. 510 с.

[2] Лящук. О., Гузенко. А., Адаптація до зміни клімату: короткий путівник для громад. Рівне: Екоклуб. 2023 р. 38.С.

[3] Поль О., Лящук О., Кондратюк О., Оцінка вразливості до зміни клімату Рівненської громади та рекомендації щодо заходів з адаптації до зміни клімату. Рівне: Екоклуб. 2022 р. 159.С.

[4] Про затвердження Концепції "Блакитно-зелені коридори Рівненської міської територіальної громади": Рішення Рівненської міської ради (восьме скликання) від 06.07.2023 р. № 3559. С.19

[5] Thiede R., Sutton T., Düster H., Sutton M., QGIS Training Manual. 2019 p. 675 C.

Інтелектуальна система теплозабезпечення будівель із застосуванням технології цифрового двійника

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.132

Володимир Волощук
Кафедра автоматизації енергетичних процесів
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Київ, Україна
Vl.Volodya@gmail.com

Павло Новіков
Кафедра автоматизації енергетичних процесів
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Київ, Україна
novikov.paolo@gmail.com

Олександр Степанець
Кафедра автоматизації енергетичних процесів
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Київ, Україна
stepanets.av@gmail.com

Анастасія Захарченко
Кафедра автоматизації енергетичних процесів
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Київ, Україна
nastochka.z@gmail.com

Інна Білоус
Кафедра теплової та альтернативної енергетики
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Київ, Україна
biloys_inna@ukr.net

Анотація — **У роботі представлено інтелектуальну низькотемпературну систему теплозабезпечення будівель, де впроваджено програмно-апаратний комплекс з реалізації технології цифрового двійника для вирішення задач оптимізації проектних та експлуатаційних параметрів системи для підвищення її ефективності (енергетичної, економічної та екологічної), а також діагностування стану роботи компонентів системи**

Ключові слова — цифровий двійник; система теплозабезпечення; конденсаційний котел.

I. ВСТУП

Одним із досягнень сучасної опалювальної техніки є використання конденсаційної технології. Ефективна робота конденсаційного котла має місце лише при застосуванні низькотемпературних систем теплозабезпечення будинків із відповідними теплотехнічними характеристиками [1].

Заснована на величезному обсязі накопичених даних, отриманих в ході вимірювань цілого ряду показників, та відповідних математичних і комп'ютерних моделях технологія цифрового двійника (ЦД) дає можливість більш точно оцінити та спрогнозувати поведінку об'єкту, швидше виявити можливі дефекти у ньому, більш обґрунтовано запропонувати технічні зміни і, як наслідок, суттєво підвищити ефективність відповідно до вибраних критеріїв [2].

На основі огляду літератури автори [2] дійшли висновку, що ЦД мають значний потенціал для підвищення енергоефективності будівель за рахунок можливості реалізації моніторингу в режимі реального часу, прогнозованого технічного обслуговування та прийняття рішень на основі реальних даних. Проведений аналіз результатів існуючих досліджень показав, що за рахунок технології ЦД вдається підвищити енергоефективність у будівлях на 10…15% і знизити їх експлуатаційні витрати на 8%.

Проведений аналіз існуючих робіт показав, що технологія ЦД може успішно застосовуватися для вирішення задач із підвищення ефективності об'єктів та систем енергетики. Зараз є потреба подальшого розвитку та удосконалення методів та засобів застосування цієї технології.

Мета роботи – розробити інтелектуальну низькотемпературну систему теплозабезпечення (СТ) будівель на базі конденсаційної модульної котельні, розробити її режимні характеристики та програмно-апаратний комплекс для підвищення енергетичної,

економічної та екологічної ефективності на основі контролю, моніторингу і діагностики такої системи та застосування сучасних інтернет-технологій.

ІІ. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Для вирішення поставленої мети було передбачено вирішення наступних завдань:

- створення та реалізація комплексу математичних та комп'ютерних моделей СТ;
- розроблення та реалізація концепції ЦД СТ;
- створення дослідного зразка на основі результатів моделювання СТ з урахуванням розроблених критеріїв її ефективності.

Відповідно до типу та характеристик системи розроблено та реалізовано комплекс математичних та комп'ютерних моделей (в Matlab, Python, EnergyPlus), які дають можливість змоделювати як єдине ціле режими роботи будинку та СТ.

Додатково до існуючих критеріїв оцінювання ефективності системи, які базуються на енергетичних балансах та техніко-економічному оцінюванні, в роботі розроблено критерії ексергетичного аналізу, які, на відміну від існуючих дають можливість визначити місцезнаходження, значення, джерела, вартість та негативний вплив га довкілля термодинамічних втрат в системі.

Створено проєктну документацію програмно-апаратного комплексу СТ, яка включає в себе: функціональну схему автоматизації конденсаційного котла МН-120к; принципову електричну схема; схеми комутації пристроїв.

Розроблено програмне забезпечення промислового комп'ютера для реалізації функцій концентратора даних від пристроїв і датчиків, архівування даних і аналітики стану обладнання. Програмне забезпечення передбачає використання програми EnergyPlus, інструменту для візуального програмування потоком даних Node-RED, системи керування базами даних InfluxDB, мови програмування Python.

Розроблено та виготовлено дослідний зразок інтелектуальної низькотемпературної СТ у вигляді експериментального стенда, який включає в себе: модульний конденсаційний котел існуючої конструкції; обв'язку конденсаційного котла; споживача теплової енергії (імітація будинку, виробниче приміщення співвиконавця тощо); програмно-апаратний комплекс системи керування СТ (блок керування, промисловий комп'ютер, додаткові датчики).

Розроблена та впроваджена архітектура програмного забезпечення ЦД, яка побудована за принципом модульної інтеграції, що забезпечує гнучкість, масштабованість і продуктивність системи. Основними компонентами є платформа Node-RED для управління потоками даних і логікою, база даних InfluxDB для зберігання часових рядів, система візуалізації Grafana та середовище виконання скриптів Python для комп'ютерного моделювання.

На основі запропонованого програмно-апаратного забезпечення розроблено рекомендації з оптимізації режимних характеристик інтелектуальної низькотемпературної СТ. Передбачено два варіанта реалізації: більш детальний та спрощений. У першому варіанті необхідно проводити енергетичний аудит із залученням фахівців та подальшим детальним розрахунком та аналізом теплових режимів будівлі, які потім передаються у розроблену систему для подальшого аналізу. У другому варіанті використовується більш спрощений підхід, який використовує отримані безпосередньо на реально діючій СТ дані із використанням мінімально можливого набору даних датчиків.

Розроблена експлуатаційна документація, регламент технічного обслуговування інтелектуальної низькотемпературної СТ у вигляді інструкції користувача.

На прикладі реального об'єкту, із застосуванням запропонованої технології, досліджено теплотехнічні характеристики СТ на базі модульної конденсаційної котельні у різних режимах та показано, зокрема, що найбільше зростання ККД котла (на 6,6 %) має місце у випадку переходу на низькотемпературні системи опалення. Перехід на переривчастий обігрів знаходиться на другому місці щодо можливостей підвищення ККД котла (до 3,5 %). Утеплення будинку також забезпечує підвищення ККД котла, але менше ніж два попередні рішення (до 2,7 %).

Аналіз можливих рішень з підвищення ефективності досліджуваної системи в комплексі показав, що зниження температурного графіка системи опалення шляхом збільшення площі нагріву або застосування більш ефективних опалювальних приладів, перехід на переривчастий обігрів, а також додаткове утеплення будівлі дає можливість підвищити середньосезонний ККД конденсаційного котла на 8,8%. При цьому сезонне споживання природного газу може бути знижене на 69 %.

Робота виконана в рамках державного замовлення Міністерства освіти і науки України (№ держреєстрації 0123U104476).

Література

[1] Satyavada, H.; Baldi, S. Monitoring Energy Efficiency of Condensing Boilers via Hybrid First-Principle Modelling and Estimation. Energy 2018, 142, 121–129, doi:10.1016/j.energy.2017.09.124.

[2] Arsecularatne, B.; Rodrigo, N.; Chang, R. Digital Twins for Reducing Energy Consumption in Buildings: A Review. Sustainability 2024, 16, 9275, doi:10.3390/su16219275.

[3] Voloshchuk, V.; Bilous, I.; Novikov, P.; Stepanets, O.; Zakharchenko, A. Digital Twin-Based Smart Heating System with a Condensing Boiler. Smart Energy 2025, 19, 100198, doi:10.1016/j.segy.2025.100198.

Використання гіс-технологій та даних космічної зйомки для аналізу динаміки площ лісового фонду (на прикладі ДП «Костопільське лісове господарство»)

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.133

Юрій Іванов
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна
yu.v.ivanov@nuwm.edu.ua

Наталія Ковальчук
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна
n.s.kovalchuk@nuwm.edu.ua

Зінаїда Буднік
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна
z.m.budnik@nuwm.edu.ua

***Анотація* – У роботі розглянуто особливості застосування геоінформаційних технологій (ГІС) і даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для аналізу динаміки площ лісового фонду на прикладі ДП «Костопільське лісове господарство». Використано супутникові знімки та глобальні набори даних Global Forest Change для визначення змін у вкритих і невкритих лісовою рослинністю ділянках у період 2000–2024 рр. Отримані результати підтверджують високу ефективність використання ГІС для моніторингу лісових екосистем і створення актуальних картографічних матеріалів.**

Ключові слова – дистанційне зондування Землі, ГІС, моніторинг лісів, Global Forest Change, супутникові знімки, Рівненська область

I. Вступ

Лісові екосистеми є важливою складовою природного середовища України, виконуючи численні екологічні, економічні та кліматорегулюючі функції. Для ефективного управління лісовими ресурсами необхідне отримання достовірної, актуальної та систематизованої інформації про стан лісового покриву.

Традиційні методи лісовпорядкування, засновані на польових обстеженнях, мають значні часові та фінансові витрати. Тому у сучасних умовах актуальним є впровадження геоінформаційних систем (ГІС) і даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які забезпечують комплексну оцінку лісових територій із високою просторовою точністю [1, 2].

Лісові екосистеми Рівненської області є важливим компонентом природного середовища, що забезпечує стабільність кліматичних процесів, регуляцію водного балансу та підтримання біорізноманіття. На території області лісистість становить близько 42 %, а значна частина площ припадає на соснові насадження Полісся, які особливо вразливі до змін клімату, пожеж і деградаційних процесів.

У сучасних умовах традиційні методи лісообліку та польових обстежень не завжди дозволяють оперативно отримувати актуальні дані про стан насаджень. Тому актуальним є впровадження геоінформаційних технологій (ГІС) та даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які забезпечують комплексну просторово-часову оцінку стану лісів [3, 4].

Для проведення моніторингу використовувалися супутникові знімки Sentinel-2 та Landsat 8, доступні через платформи Google Earth Engine та Copernicus Open Access Hub. Обробка даних здійснювалася в середовищах QGIS та ArcGIS Pro.

Для оцінювання стану рослинності застосовано індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який дозволяє визначати ступінь життєздатності рослинного покриву, а також індекс NBR (Normalized Burn Ratio) для виявлення ділянок, уражених пожежами.

II. ВИКЛАДОСНОВНОГОМАТЕРІАЛУ

Метою дослідження є встановлення динаміки площі лісових насаджень на території ДП «Костопільське лісове господарство» за допомогою супутникових даних.

Основні завдання:

• узагальнення сучасних методів дистанційного зондування Землі для моніторингу лісів;

• аналіз можливостей використання наборів даних Global Forest Change;

• створення картографічних матеріалів лісового покриву підприємства;

• оцінка точності отриманих карт та побудова довірчих інтервалів динаміки площ лісів.

Об'єктом дослідження є лісові насадження ДП «Костопільське лісове господарство», розташованого в центральній частині Рівненської області. Підприємство охоплює сім лісництв загальною площею 37 964 га.

У роботі використано такі джерела даних:

• супутникові знімки систем Landsat 8, Sentinel-2;

• глобальний набір даних Global Forest Change (GFC);

• базові картографічні дані OpenStreetMap;

• середовище Google Earth Engine та QGIS для обробки та візуалізації результатів.

Дешифрування зображень виконувалося методом порогової класифікації із порогом зімкнутості деревостанів 40 %, що відповідає повноті насаджень 0,3 для умов Полісся України.

Створення картографічних матеріалів лісового покриву виконувалось в середовищах Google Engine API та QGIS. Взявши до уваги такий факт, що кінцевим картографічним матеріалам можуть бути властиві помилки, їх було відфільтровано, врахувавши мінімальну величину площу лісових насаджень (0,1га). Оперуючи цим з карти видалили поодинокі групи пікселів.

На рис. 1 зображено карту лісів ДП «Костопільське ЛГ», що була отримана за даними набору даних GFC.

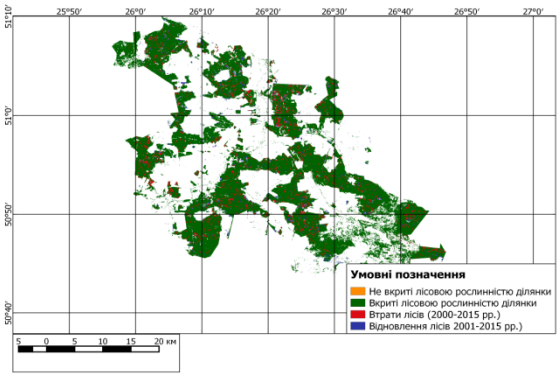


Рис. 1. Карта, що відображає зміни лісового покриву ДП «Костопільське ЛГ»

Для порівняння дану карту було накладено на знімки OpenStreetMap. Звідси видно, що вони добре узгоджені між собою (рис. 2)

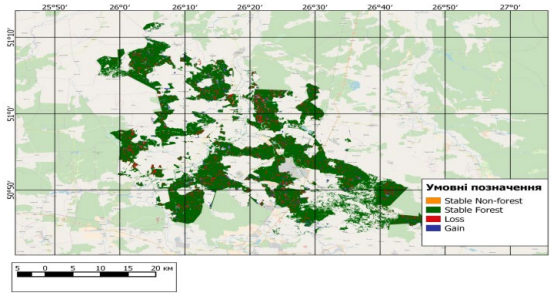


Рис. 2. Тематична карта змін лісового покриву, що накладена на знімки OpenStreetMap

Вищенаведені програмні продукти дають змогу розрахувати площу лісового покриву зони діяльності підприємства. Для цієї мети потрібно створити «лісову маску», при цьому віднявши від вже одержаної карти страти loss та gain. На рис. 3 представлено «лісову маску» ДП «Костопільське ЛГ».

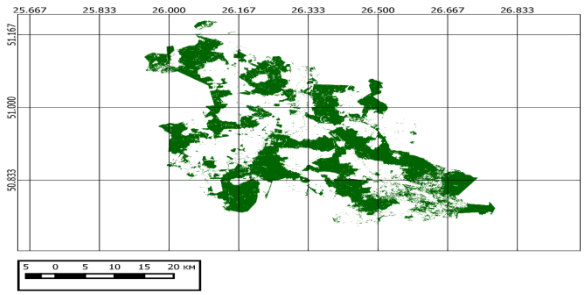


Рис. 3. Карта лісового покриву досліджуваної території

Часові серії знімків Google Earth суттєво змінили та спростили процес візуального дешифрування породного складу лісових насаджень. Звідси листяні насадження найкраще ідентифікуються опираючись на аналіз знімків, які отримані на протязі періоду вегетації та осіннього чи зимового сезонів, тобто тоді коли вони знаходяться в без листяному стані. Приклад збору опорної інформації наведено на рис.4.

Під час інтерпретації даних приймалося, що кожна вибіркова одиниця являє собою центр ділянки, площею 0,1 га на місцевості. Прийняття рішення про віднесення ділянки до тої чи іншої категорії було на основі положення її центру, а зімкнутість насаджень – відповідно за співвідношенням між кількостями точок сітки, що потрапили на крони та їхньою загальною кількістю для вибіркової одиниці (рис. 4).

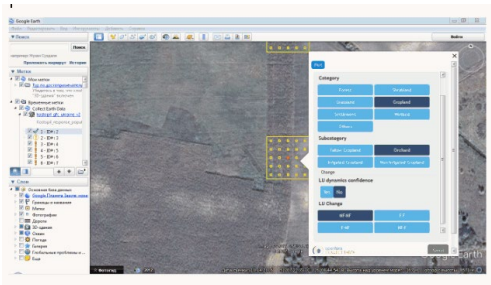


Рис. 4. Дешифрування вибіркових одиниць за допомогою програмних продуктів Collect Earth та Google Earth

Кількість вибіркових одиниць в адміністративному районі становить 965 спостережень. Лісові насадження становлять 460 спостережень (47,7% від загального обсягу). З них 270 спостережень представляють хвойні насадження, 79 – листяні, 107 – мішані.

Оцінка точності тематичних карт полягає у порівнянні картографічних результатів категорій земного покриву з опорними даними, які були одержані статистичними методами. Звісно, що найточнішими є дані, які зібрані наземними методами, проте більш практично використовувати результати візуального дешифрування знімків, в порівнянні з результатами тематичної обробки.

Основою в оцінці точності карт є побудова матриці помилок. Вона дозволяє визначити ступінь узгодженості між класифікованими та фактичними даними. Ідеальним варіантом являється, коли опорні дані такої хорошої якості, аби їхні дані повністю узгоджувалась з наземними даними. Проте інформації опорних даних властива невизначеність, що підлягає додатковій оцінці на основі розрахунку матриці помилок.

Основні показники точності, які отримують з матриці помилок, представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Показники точності класифікації при ймовірності 0,95

Показники точності	Producer' s accuracy	Довірчий інтервал Producer' s	User accuracy	Довірчий інтервал User accuracy	Overal l accuracy	Довірчий інтервал Overall
Ліс (F-F)	0,892	±0,029	0,925	±0,028	0,911	±0,019
Втрати лісів (F-NF)	0,759	±0,133	0,765	±0,083	NA	NA
Відновлення (NF-F)	0,364	±0,091	0,916	±0,056	NA	NA
Не ліс (NF-NF)	0,987	±0,01	0,909	±0,028	NA	NA

Даючи оцінку створеній карті, можна сказати, що для таких класів, як «Ліс» (F-F), відновлення (NF-F) і «Не ліс» (NF-NF), карта оцінює з досить високою точністю. Тобто 92,5% віднесених одиниць вибірки до класу «Ліс» і справді є лісом, з невеликою помилкою точності , що становить ±2,8%. Тобто площа ділянок вкритих лісовою рослинністю становить 63699,7±2644,8 га. Відновлення відбулося на площі 6687,1±1663,2 га і не лісові площі становлять 73902,4±2341,5 га. Що свідчить про те, що дані можна використовувати для картографічної основи про ліси досліджуваного регіону.

Однак для такого класу, як «Втрата лісів» (F-NF) точність є дещо нижчою і відповідно до розрахунків становить 76,5%. Тобто карта дещо гірше відображає процес втрати лісів. Проте частка втрат лісу від загальної площі становить не значну долю, а саме 5310,8±1020,8 га, то можна дійти висновку, що на загальну точність карти це має не значний вплив. В цілому ж точність даної карти становить 87,9%. А отже, таку карту можна брати до уваги та використовувати для моніторингу лісового покриву зони діяльності підприємства. На основі розрахунків було визначено лісистість ділянок території в зоні діяльності підприємства (табл. 2).

Таблиця 2

Показники лісистості території

Тематичні класи	Фактична частка площі	Скоригована частка площі	Помилка частки площі (p=0,95)
Ліс(F-F)	0,4105	0,4258	0,0177
Втрати лісу (F-NF)	0,0353	0,0355	0,0068
Відновлення (NF-F)	0,0178	0,0447	0,0111
Не ліс (NF-NF)	0,5364	0,4940	0,0157

Запроектований у роботі метод дозволяє оперативно виконувати аналіз динаміки лісового покриву. Так, з використанням стратифікованої вибірки та візуального дешифрування опорних даних дозволяє здійснити інтервальне оцінювання площі окремих тематичних класів і встановити фактичну лісистість регіону.

Застосування наборів Global Forest Change дозволило оперативно оцінити динаміку площ лісових насаджень без залучення дорогих польових досліджень. Супутникові дані є відкритими, безкоштовними і доступними для широкого кола користувачів, що створює умови для формування єдиної цифрової екосистеми моніторингу лісів України.

Серед основних переваг використання ГІС у лісовому господарстві можна виділити:

• автоматизацію збору й аналізу просторових даних;

• можливість поєднання супутникових і польових спостережень;

• створення інтерактивних картографічних ресурсів;

• підвищення точності управлінських рішень у сфері лісокористування.

Використання середовища Google Earth Engine спрощує обробку великих обсягів супутникової інформації та дозволяє візуалізувати зміни у часових рядах. У поєднанні зі статистичними пакетами системи R це відкриває перспективи для моделювання та прогнозування тенденцій у розвитку лісових екосистем.

III. ВИСНОВКИ

У дослідженні підтверджено ефективність використання геоінформаційних технологій (ГІС) та даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для аналізу динаміки площ лісового фонду на прикладі ДП «Костопільське лісове

господарство». Отримані результати засвідчили, що методи супутникового моніторингу дають можливість оперативно та з високою точністю оцінювати зміни лісового покриву.

Аналіз наборів даних Global Forest Change у поєднанні з супутниковими знімками Sentinel-2 та Landsat 8 дозволив визначити просторово-часові тенденції втрат і відновлення лісів у період 2000–2024 рр. Встановлено, що площа вкритих лісовою рослинністю територій становить 63,7 тис. га, а частка втрат лісів — близько 5,3 тис. га. Відновлення лісових насаджень зафіксовано на площі 6,7 тис. га, що свідчить про поступове збільшення загальної лісистості регіону.

Оцінка точності тематичної класифікації показала, що загальна точність карти становить 87,9 %, що є прийнятним для регіонального моніторингу. Найвищу точність продемонстрували класи «Ліс» і «Не ліс», що забезпечує надійну основу для подальшого використання цих картографічних матеріалів у практиці лісового господарства.

Запропонований підхід до моніторингу лісових територій може бути застосований для оперативного оцінювання динаміки лісового покриву в інших регіонах України. Його перевагами є доступність вихідних даних, автоматизація процесів аналізу, зменшення потреби у дорогих польових роботах та можливість інтеграції результатів у національні системи екологічного моніторингу.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на поєднання даних дистанційного зондування з результатами наземних обстежень, удосконалення алгоритмів автоматичної класифікації супутникових зображень та створення єдиної геоінформаційної платформи для моніторингу стану лісових екосистем України.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Жолобак Г. М. Вітчизняний досвід супутникового моніторингу лісових масивів України. Космічна наука і технологія. 2010. С.46-54.

[2] Лесів М. Ю., Щепащенко Д. Г., Швиденко А. З., Бунь Р. А. Побудова карти лісів України за даними глобальних цифрових карт земельного покриву. Наук. вісн. НЛТУ України, 2012. Вип. 22.9. С. 24–30.

[3] Миклуш С. І. Горошко М. П., Часковський О. Г. Геоінформаційні системи в лісовому господарстві. Навчальний посібник. Львів: НЛТУ України, 2006. 128 с.

[4] Миронюк В. В., Білоус А. М. Узгодженість оцінок площі лісів за даними глобальної карти змін лісового покриву і мультиспектральних супутникових знімків. Науковий вісник НЛТУ України, 2017, т. 27, № 5. 9 с.

[5] Breiman, L. (2001). Random Forest. Machine Learning, 45(1), 5–32.

[6] Congalton R. (2008). Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. NY.

[7] Hansen, M. C. et al. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science, 342(6160), 850–853.

[8] Gougeon F. A. (2006). The individual tree crown approach applied to Ikonos images of a coniferous plantation area. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72(11), 1287–1297.

[9] Державне агентство лісових ресурсів України (2023). Звіт про стан лісів Рівненської області.

MCIT
Modeling, control & information technologies

Аналіз динаміки розливу річки Стир методами дистанційного зондування Землі

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.134

Андрій Калько
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
a.d.kalko@nuwm.edu.ua

Тетяна Басюк
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
t.o.basyuk@nuwm.edu.ua

Маргарита Яковишина
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
m.s.yakovyshyna@nuwm.edu.ua

Богдан Конарівський
ВСП «Рівненський технічний фаховий коледж НУВГП»
Рівне, Україна
bkonarivskij@gmail.com

***Анотація* — У статті проаналізовано розлив річки Стир біля с. Млинок у 2024 році з використанням супутникових даних Sentinel-1 та Sentinel-2. Встановлено, що найефективнішими методами для моніторингу затоплення є спектральний індекс NDWI та композит SWIR, а радарні знімки незамінні для відстеження динаміки повені через хмарність. Результати підтверджують високу ефективність комплексного підходу ДЗЗ для оперативного оцінювання наслідків паводків в умовах Полісся.**

Ключові слова — *дистанційне зондування Землі, повінь, річка, моніторинг.*

I. Вступ

Природно-кліматичні умови Українського Полісся обумовлюють розвиток на річках регіону інтенсивних тало-дощових паводків. Активне сніготанення навесні спричиняє різке підвищення рівня води в басейні Прип'яті, зокрема у річці Стир, що в поєднанні з широкими заплавами поліських річок призводить до масштабних розливів та затоплення прилеглих територій. Ці повені супроводжуються серйозними соціально-економічними наслідками, включаючи пошкодження населених пунктів, сільськогосподарських угідь, інфраструктурних об'єктів, а також деградацію екосистем внаслідок забруднення водойм і ґрунтів.

Високий потенціал для ефективного моніторингу таких явищ забезпечують технології дистанційного зондування Землі, оскільки водні об'єкти чітко ідентифікуються на космічних знімках завдяки значному діапазону зйомки та високій просторовій роздільній здатності [1].

Наземні методи моніторингу водного режиму часто виявляються недостатніми для забезпечення цілісного контролю та ефективного управління паводковою ситуацією. На противагу цьому, технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) забезпечують регулярний моніторинг ризикових територій, високу оперативність отримання інформації та широту огляду. Інтеграція ДЗЗ із сучасними геоінформаційними системами дозволяє здійснювати збір, швидку автоматизовану обробку та комплексний аналіз просторових даних, а також візуалізувати результати, що значно підвищує ефективність контролю за поширенням повеней та прогнозування масштабів затоплення. Зокрема, комп'ютерні алгоритми дозволяють автоматично виявляти межі «вода-суша» та визначати площу затоплених територій [2].

Метою дослідження було оцінити масштаби розливу річки Стир у північній частині Рівненської області на основі супутникових знімків за 2024 рік. Дослідження зосереджено на ділянці біля населеного пункту Млинок, де розташований гідрологічний пост спостережень, що забезпечує репрезентативність даних.

II. Методи дослідження

Для моніторингу різних фаз водного режиму було застосовано комплекс методів дистанційного зондування. При роботі з оптичними даними супутника Sentinel-2 використовувались спектральні комбінації каналів (у тому числі SWIR) та розрахунок спектральних індексів. Для аналізу радарних знімків Sentinel-1 застосовувалась методика покращеної візуалізації, що включає радіометричну корекцію рельєфу. Таке поєднання методів дозволило комплексно дослідити динаміку розливу річки незалежно від метеорологічних умов.

III. Основні результати дослідження

Візуалізацію результатів моніторингу представлено на рис. 1, рис. 2. Для мультиспектральних знімків Sentinel-2 застосовано

різні комбінації каналів: композит SWIR (короткохвильовий інфрачервоний діапазон), спектральні зрізи True Color та False Color.

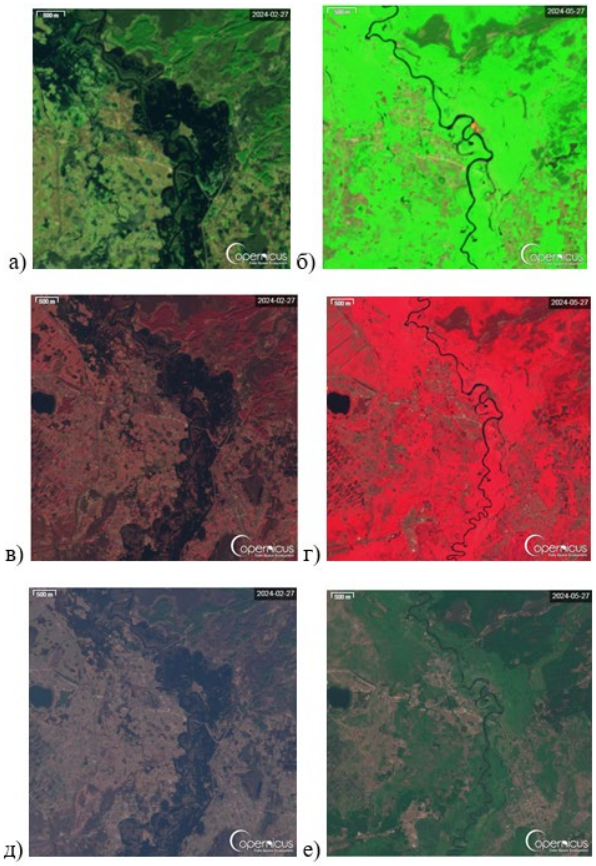


Рис. 1. Дослідження розливу річки Стир у селі Млинок у різні фази водного режиму за 2024 рік за даними супутника Sentinel-2: а) композит SWIR, 27 лютого; б) композит SWIR, 27 травня; в) композит False Color, 27 лютого; г) композит False Color, 27 травня; д) композит True Color, 27 лютого; е) композит True Color, 27 травня [3].

Примітка. На знімках SWIR (а, б) чорним кольором ідентифікуються водні об'єкти, що дозволяє точно відстежувати динаміку розливу. У травневих знімках виявлено сліди пожежі, які виразно проявляються у SWIR-діапазоні.

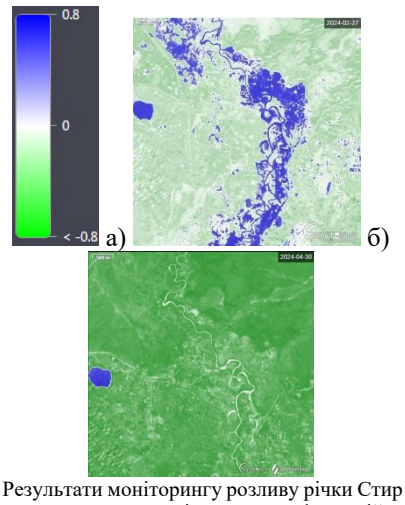


Рис. 2. Результати моніторингу розливу річки Стир поблизу с. Млинок за допомогою нормалізованого диференційного індексу води (NDWI): а) стан на 27 лютого 2024 р.; б) стан на 27 травня 2024 р. [3].

Примітка. Сині та блакитні відтінки на індексних зображеннях відповідають водним поверхням та зонам затоплення. Порівняльний аналіз візуалізує значне скорочення площі розливу між весняним та літнім періодами.

На рис. 2 наведено результати автоматичного розрахунку нормалізованого диференційного індексу води (NDWI). Порівняльний аналіз виявив найвищу ефективність виокремлення зон розливу при використанні індексних зображень NDWI, композиту SWIR та радарних знімків.

Під час аналізу супутникових знімків за травень 2024 року на досліджуваній території було ідентифіковано пожежу, яка чітко фіксується у спектральній комбінації SWIR (Short Wave Infrared RGB), спеціалізованій для моніторингу вогневих подій та їх наслідків. У даному композиті спостерігається характерна колірна диференціація об'єктів: водні поверхні відображаються чорним кольором, рослинність - спектром зелених відтінків, а антропогенні поверхні та ґрунти - варіаціями коричневого кольору (рис. 1а-б). Ця особливість візуалізації дозволяє одночасно аналізувати як гідрологічні, так і пірологічні процеси на території дослідження.

Для кількісної оцінки динаміки водного покриву в районі дослідження було застосовано нормалізований диференційний індекс води (NDWI). Автоматичний розрахунок індексу виконано в середовищі Copernicus Browser, що дозволило отримати об'єктивні дані щодо змін площі розливу річки Стир біля населеного пункту Млинок (рис. 2).

Методичною основою дослідження слугувала стандартна формула розрахунку NDWI [4]:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (1)$$

де GREEN - зелений діапазон (канал B3), NIR - ближній інфрачервоний діапазон (канал B8).

Інтерпретація отриманих значень NDWI базувалася на усталених критеріях [3]: значення індексу > 0,5 характеризують постійні водні об'єкти, діапазон 0,2-0,5 вказує на затоплені ділянки з рослинністю, а значення < 0,2 відповідають суходолу. Ця класифікація забезпечила точне виокремлення як постійної акваторії, так і тимчасово затоплених територій.

Вимірювання морфометричних характеристик розливу річки виконувались в середовищі Copernicus Browser (рис. 3). Порівняльний аналіз різних методів візуалізації підтвердив, що найбільш ефективними для ідентифікації та точного вимірювання затоплених територій є композит SWIR та індексні зображення NDWI. Ці методи забезпечують оптимальну контрастність між водними об'єктами та іншими типами покриттів, що є вирішальним для проведення кількісних морфометричних досліджень.

Важливим методичним аспектом дослідження стало подолання обмежень, пов'язаних із високою хмарністю, характерною для Полісся під час паводкового періоду. Для забезпечення безперервності моніторингу було застосовано радіолокаційні знімки супутника Sentinel-1, принцип роботи яких ґрунтується на активному зондуванні поверхні та є нечутливим до метеорологічних умов та освітленості. Спеціальний скрипт "Покращена візуалізація" (Enhanced Visualization) дозволив оптимізувати інтерпретацію радарних даних шляхом застосування кольорової палітри, де водні об'єкти та

зони затоплення ідентифікуються за синьо-бірюзовою гамою, а суходіл диференціюється у спектрі зелено-жовтих відтінків відповідно до типу покриття [3].

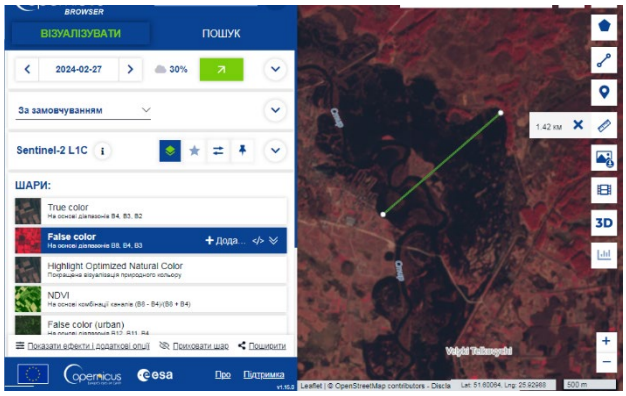


Рис. 3. Визначення ширини розливу р. Стир у межах населеного пункту Млинок (супутниковий знімок Sentinel-2, композит False Color, 27 лютого 2024 р.)

Порівняльний аналіз ефективності різних супутникових систем показав, що радарні знімки, незважаючи на нижчу просторову деталізацію та наявність спектральних шумів у порівнянні з мультиспектральними даними, є незамінними для відстеження повної динаміки повеневого процесу. Їхня унікальна цінність полягає в здатності забезпечувати точну фіксацію хронології паводкової фази – від початку розливу до його повного сходу – в умовах інтенсивної та тривалої хмарності, коли отримання якісних оптичних знімків є неможливим (рис. 4). Це робить інтеграцію даних Sentinel-1 обов'язковим компонентом будь-якої комплексної системи моніторингу паводків у регіонах з подібними кліматичними умовами. (рис. 4).

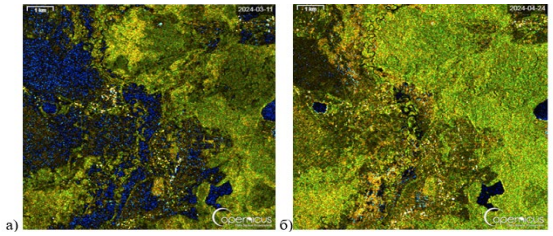


Рис. 4. Динаміка розливу річки Стир поблизу с. Млинок за радіолокаційними даними Sentinel-1 (покращена візуалізація, enhanced visualization): а) стан на 11 березня 2024 р.; б) стан на 24 квітня 2024 р.

Проведений порівняльний аналіз радарних знімків Sentinel-1 за березень та квітень 2024 року виявив чітку динаміку скорочення площі розливу річки Стир. Дані показують суттєве звуження меж паводкових вод між березневим піком паводку та квітневим періодом, що візуалізує природний цикл сходження повені. Ця спостережувана динаміка підтверджує ефективність радіолокаційного моніторингу для фіксації тимчасових змін у гідрологічному режимі річки.

Критично важливим результатом є підтвердження операційної цінності радарних знімків Sentinel-1 для моніторингу в умовах погіршеної видимості. Незважаючи на інтенсивну хмарність, характерну для весняного періоду в регіоні, радарні дані забезпечили безперервний потік інформації, дозволивши точно відстежити всі фази паводкової динаміки. Ця перевага робить радіолокаційний моніторинг незамінним інструментом для створення надійної системи спостереження за повенями в умовах Полісся, де традиційні оптичні методи часто виявляються неефективними через метеорологічні умови..

IV. ВИСНОВКИ

Проведене дослідження підтвердило високу ефективність комплексного використання різних методів дистанційного зондування для моніторингу динаміки розливу річки Стир. Встановлено, що найбільш інформативними для візуалізації та точного виокремлення затоплених територій є індексні зображення NDWI та композит SWIR на основі даних супутника Sentinel-2. Ці методи забезпечують оптимальну контрастність між водними об'єктами та іншими типами покриттів, що є вирішальним для проведення якісного аналізу та кількісних вимірювань.

Незважаючи на нижчу просторову деталізацію та наявність шумів, радіолокаційні знімки Sentinel-1 є незамінними для безперервного відстеження паводкових процесів. Їхня ключова перевага – нечутливість до хмарності та атмосферних умов – робить їх єдиною альтернативою для моніторингу в умовах інтенсивної хмарності, характерної для Полісся під час паводкового періоду. Таким чином, радарні дані виступають не заміною, а важливим доповненням до оптичних знімків, дозволяючи точно фіксувати хронологію повені (дат початку, піку та сходу води) навіть за відсутності ясних оптичних знімків.

Поєднання оптичних і радарних супутникових даних формує надійну основу для створення ефективної системи оперативного моніторингу, прогнозування та оцінки наслідків повеней. Запропонований методичний підхід дозволяє не лише фіксувати розливи, які відбулися, але й моделювати потенційні зони затоплення. Це має ключове значення для розробки превентивних заходів, планування надзвичайних ситуацій, забезпечення своєчасного оповіщення населення та мінімізації соціально-економічних збитків. Отримані результати відкривають перспективи для подальших досліджень, зокрема, для створення автоматизованих алгоритмів раннього попередження про паводкові загрози на основі аналізу часових серій супутникових даних, а також для інтеграції отриманих даних в системи підтримки прийняття управлінських рішень органами місцевого самоврядування та рятувальних служб.

Література

[1] Іванов Д., Каштан В.. Геоінформаційна технологія виявлення та моделювання затоплених зон міста Дубай на основі згорткової нейронної мережі. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. 2024. № 4. P. 99–113. https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-13.ДБН А.2.1-1-2014.

[2] Інформаційна технологія моніторингу повеней з використанням даних ДЗЗ / Л. І. Самойленко та ін. Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15. № 3. С. 50–55.

[3] Copernicus browser. URL: https://browser.dataspace.copernicus.eu/

[4] NDWI: Нормалізований Диференційний Індекс Вологості. EOS DATA Analytiks : веб сайт. URL: https://eos.com/uk/make-an-analysis/ndwi/

Геоінформаційний аналіз впливу мережі каналів на формування поверхневого стоку масиву Сомине Рівненського природного заповідника

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.135

Василь Корбутяк
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
v.m.korbutiak@nuwm.edu.ua

Віктор Мошинський
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
v.s.moshynskyi@nuwm.edu.ua

Ігор Статник
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
i.i.statnik@nuwm.edu.ua

Михайло Франчук
Рівненський природний заповідник
м. Сарни, Україна
m_franchuk@ukr.net

***Анотація* — Продемонстровано ефективність геоінформаційних технологій (ГІС) для комплексного аналізу природних умов, гідрологічного режиму та можливостей відновлення водного балансу Рівненського природного заповідника. ГІС-аналіз дозволив інтегрувати різноманітні дані для побудови просторових моделей і визначення ключових факторів формування поверхневого стоку.**

***Ключові слова* — Рівненський природний заповідник, Сомине, картографічне моделювання, Sentinel-1.**

I. Вступ

У сучасних умовах збереження природних екосистем є стратегічно важливим завданням. Відновлення водного режиму болотних масивів, які виконують ключову роль у регуляції клімату, збереженні біорізноманіття та підтриманні водного балансу, вимагає інноваційних підходів. Використання геоінформаційних технологій дозволяє забезпечити високу точність аналізу, інтегрувати різнорідні дані та створювати ефективні плани відновлення водного режиму природоохоронних територій.

До унікальних природоохоронних територій належить Рівненський природний заповідник, котрий включає великі болотні масиви із природною та штучною гідрографічною мережею. Водний режим цих територій є ключовим фактором збереження природних екосистем, а також важливим індикатором екологічного стану заповідника. Однак зміни клімату, антропогенні втручання, зокрема діяльність, пов'язана з осушувальною меліорацією, призвели до дисбалансу гідрологічного режиму. Для збереження екологічної рівноваги та відновлення природних умов необхідний системний підхід до вивчення динаміки поверхневих вод із використанням сучасних геоінформаційних технологій.

II. Результати

Після завершення використання земель болотних масивів для сільськогосподарських потреб на їх територіях залишилася мережа каналів (рис. 1).

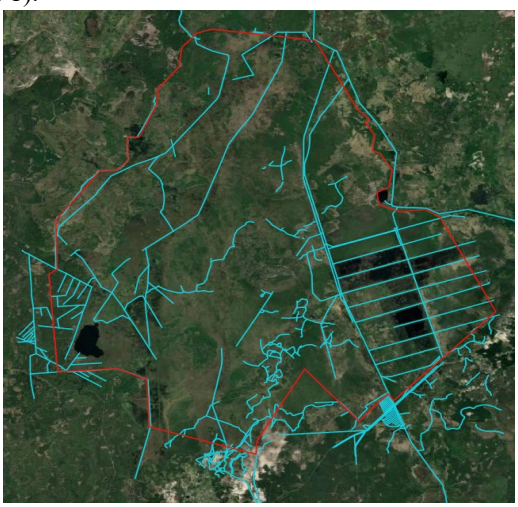


Рис. 1. Мережа каналів, що ідентифікується на масиві Сомине (дата знімання 5/10/2021, [1])

Частина з них досі активно відводить воду, також є ділянки каналів, заблоковані бобровими загатами.

У вибірку також потрапили канали, котрі були нелегально побудовані для видобутку бурштину.

Кожна із цих споруд по-різному впливає на болотний масив залежно від пори року. У літній період там може не бути води, тоді як навесні відбувається активне відведення води за межі болота. Тому нами виконано оцінку впливу існуючих каналів на умови утримання води по території болотних масивів.

Спершу відобразимо модель території перед паводком (рис. 2), використавши знімання від 7 травня 2019 [2].

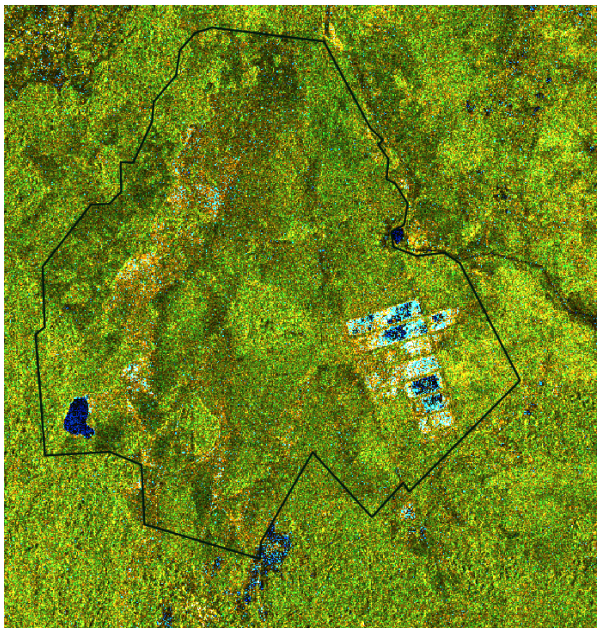


Рис. 2. Масив Сомине у меженний період

Тепер розглянемо дощовий паводок 16-19 травня 2019 року, котрий охопив значну частину Сарненського району (басейн р. Случ, р. Ствига). Детальніше про перебіг паводка можна дізнатися з онлайн-ресурсів [2]

Паводок можна віднести до гідрологічної події з 5% імовірності перевищення.

Радарна модель (рис. 3) отримана на основі VH-поляризації (випромінюється вертикальна, приймається горизонтальна поляризація), створена на 17.05.2019, показує затоплені зони та області з підвищеною вологістю. Темно-сині та блакитні кольори відповідають відкритим водним дзеркалам. Зазначимо, що моделі, створені на основі оптичних знімків, зазвичай не підходять для моніторингу поширення дощових паводків, оскільки небо часто вкрите хмарами.

Аналіз рисунка свідчить про те, що значну роль у поповненні запасів води відіграє р. Льва (притока р. Ствига), зі східного боку масиву. Також живлення масиву відбувається з південного боку водами р. Люблинка (притока р. Случ), яка на сьогодні перетворена у магістральний канал осушувальної системи. Під час проходження максимальних витрат води відбувається вихід води на заплаву, що сприяє її переміщенню на територію масиву між річками Льва та Случ. Внаслідок цього формується водно-повітряний режим, сприятливий для розвитку болотних екосистем.

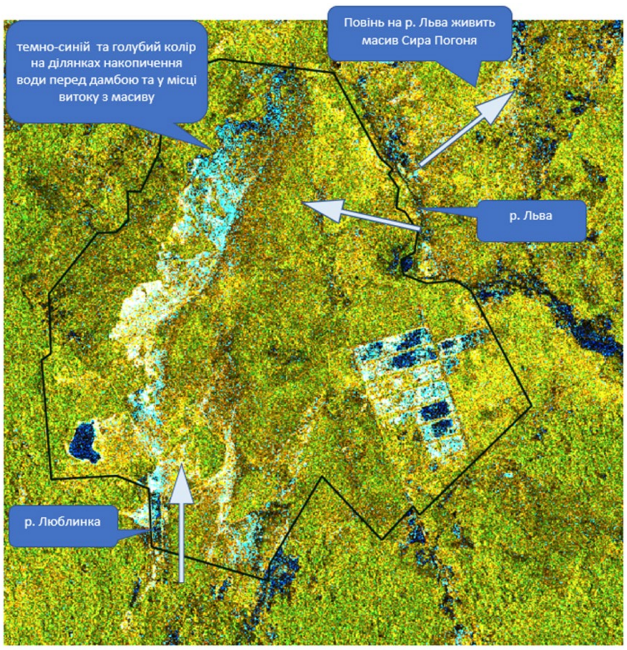


Рис. 3. Масив Сомине під дією паводка у басейні р. Льва.

Під час стояння максимальних рівнів води на масиві Сомине серед штучних споруд найбільшу роль відіграє дамба, що простягається з південно-західної до північної частини масиву. Її розташування чітко ідентифікується західною межею блакитної та світло-жовтої зони (рис. 4).

Як бачимо, задамбовий простір теж затоплюється у період високих вод. Однак, як свідчить чітка візуалізація різниці інтенсивності відбитого сигналу, дамба за багаторічний період сформувала певну ландшафтну різницю через затримку поверхневих вод: східна сторона є явно більш обводненою. Для зручності просторової оцінки на модель вологості поверхні землі накладемо фрагмент топографічної карти.

На спаді паводку та у меженний період водний потік повертається до русла, і вже починає проявлятися осушувальний вплив каналів. Вода не затримується на масиві. Як наслідок, відкриті водні дзеркала зникають до середини весни, що впливає на умови розвитку автохтонної флори та фауни. Торфові ґрунти масиву не насичуються водою, а навпаки, віддають її у дренажну мережу. Це стає чинником посилення маловодності у посушливий період і призводить до підвищення ризику виникнення пожеж на сухих ділянках.

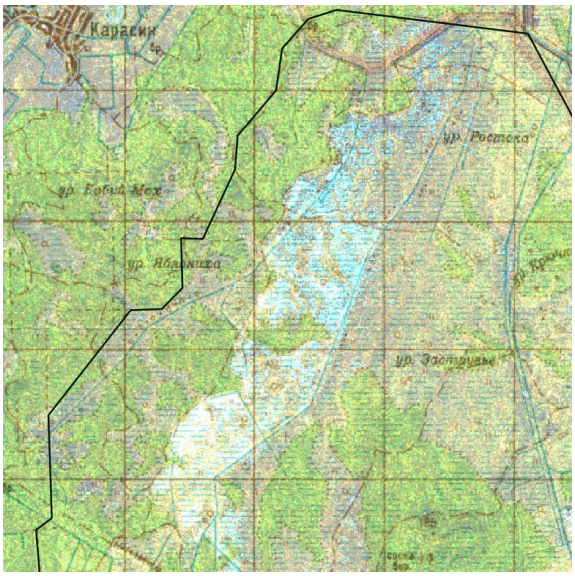


Рисунок 4 – Вплив дамби на розподіл поверхневого стоку – накладання топографічної карти та радарної моделі VH-поляризації знімка Sentinel 1 від 17 травня 2019 року.

Слід зазначити, що досить інтенсивне відведення води із західної, задамбової частини масиву Сомине останнім часом здійснюється каналом, побудованим на межі землекористувань Рівненського природного заповідника та ДП «Ліси України».

На фрагменті супутникового знімка показано вплив будівництва (рис.5).



Рис. 5 – Канал, побудований вздовж західної межі масиву Сомине

Рожевим кольором показано лінії акумуляції поверхневого стоку. Як видно, канал перехоплює та відводить грунтові води, котрі мали насичувати навколишні території до с. Карасин. За даними натурних обстежень працівниками заповідника встановлено, що канал має ширину 7 метрів, заглиблення каналу складає близько 2 метрів. У ньому сформувався потік води глибиною до 1,5 м, що у створі вимірювань відводить 145 л/с.

III. Висновки

Рівненський природний заповідник характеризується болотними масивами, слабко нахиленою поверхнею, великою кількістю відкритих водних дзеркал і торф'яними ґрунтами, що сприяють накопиченню вологи. Аналіз геологічної будови, ґрунтового складу та гідрографічної мережі підтвердив, що ці чинники визначають особливості водного режиму території.

Глибокі канали, що повністю проходять крізь товщу торфів, спричиняють зниження рівня грунтових вод, розриваючи капілярний зв’язок між верхнім та водонасиченим шаром ґрунту. Незважаючи на те, що канал може стати перепоною для поширення вогню в безвітряну погоду (за умови достатньої кількості води в ньому), він також спричиняє збільшення кількості сухостою. Найголовніше – канал формує прошарок сухого торфу, який практично неможливо загасити на значній площі (близько 13 км²) масиву Сомине.

Подібним чином спрацьовують інші канали в межах масиву (рисунок 1). Багато з них втратили свою протічність через боброві загати, але загалом на момент обстежень каналів, сумарна кількість води, котра організовано відводилася з болотного масиву через меліоративні канали, склала на рівні 350 л/с .

Література

[1] Google LLC. (2021). *Google Satellite imagery, 5 October 2021*. Accessed via QGIS. https://maps.google.com/

[2] Європейське космічне агентство (ESA). Радарне зображення *Sentinel-1* у VH-поляризації, створене на дату 17.05.2019, отримане через EO Browser (платформа *Copernicus Open Access Hub*). URL: https://eobrowser.org/

[3] https://tsn.ua/ukrayina/na-rivnenschini-pislya-rekordnoyi-zlivi-potonulo-selo-lyudi-lishilisya-bez-yizhi-ta-vodi-1347141.html, https://rivnepost.rv.ua/news/velika-voda-v-rokitnomu-zatopleni-budinki

MCIT Modeling, control & information technologies

Idempotent elements of the semigro up $BB_{XX}(DD)$ defined by semilattice of the class $\sum_{22}(XX, 55)$

https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.136

Aleksandre Bakuridze
Department of Physics and Mathematics
Batumi Shota Rustaveli State University
Batumi, Georgia
aleksandre.bakuridze@bsu.edu.ge

Omar Givradze
Department of Physics and Mathematics
Batumi Shota Rustaveli State University
Batumi, Georgia
omar.givradze@bsu.edu.ge

Ibraim Didmanidze
Department of Languages and Information Technologies
Batumi Shota Rustaveli State University
Batumi, Georgia
ibraim.didmanidze@bsu.edu.ge

Tengiz Didmanidze
Department of Physics and Mathematics
Batumi Shota Rustaveli State University
Batumi, Georgia
didmanidzetengiz@gmail.com

Abstract. The article discusses complete semigroups of binary relations defined by semilattices of the class $\sum_2(X,5)$. It is described idempotent elements of complete semigroups of binary relations defined by semilattices of the class $\sum_2(X,5)$. In the case of finite semigroups, the formula for calculating idempotent elements is obtained. It is shown that the order of any subgroup $G_X(D,\varepsilon)$ of a semigroup $B_X(D)$ does not exceed 2.

Keywords: complete semigroup, semilattice, binary relation, idempotent element.

I. INTRODUCTION

In this paper, we consider complete semigroups of binary relations defined by complete X-semilattice of unions. It is known that the properties of the complete semigroups of unions are closely related to the properties of the semilattice by which this semigroup is defined. Because of this, we fix the diagram of semilattices (We denote this class of semilattices with the symbol $\sum_2(X,5)$) and study the properties of the corresponding semigroup. Using the quantities of reflections, we also obtained the formula for calculating the number of idempotent elements of finite semigroups.

II. THE THEORETICAL PART

Let X and $\sum_2(X,5)$ represent, respectively, any non-empty set and such a class of semilattices X of mutually isomorphic unions, each element of which is isomorphic to the upper semilattices $D_\zeta = \{\breve{D}_\zeta, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4\}$, satisfying the following condition:

$$Z_4 < Z_3 < Z_1 < \breve{D}_\zeta,\ Z_4 < Z_2 < \breve{D}_\zeta,\ Z_1 \backslash Z_2 \neq \emptyset,$$
$$Z_2 \backslash Z_1 \neq \emptyset, Z_3 \backslash Z_2 \neq \emptyset, Z_2 \backslash Z_3 \neq \emptyset \ldots (1)$$

The upper semilattice satisfying condition (1) is shown in Fig. 1.

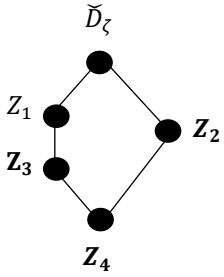


Fig:1

Theorem 1. Suppose $D \in \sum_2(X,5)$. A binary relation α of a semigroup $B_X(D)$ is an idempotent element of this semigroup only if it satisfies at least one of the following conditions:

a) $\alpha = X \times Z$ for any $Z \in D$;

b) α=(Y_1^α×Z)∪((X\Y_1^α)×Z'), where Z,Z'∈D, Y_1^α⊂X and satisfies the following conditions: Z⊂Z', Y_1^α≠∅, Y_1^α⊇Z ϖ Z'\Y_1^α≠∅;

c) α =(Y_1^ α × Z)∪(Y_2^α×Z')∪((X\(Y_1^α∪Y_2^α))×Z'') where $Z,Z', Z'' \in D$ and pairwise disjoint subsets Y_1^α and Y_2^α of set X satisfy the following conditions: $Z \subset Z' \subset Z''$, $Y_1^\alpha \neq \emptyset$, $X\backslash(Y_1^\alpha \cup Y_2^\alpha) \neq \emptyset$, $Y_1^\alpha \supseteq Z$, $Y_1^\alpha \cup Y_2^\alpha \supseteq Z'$, $Y_2^\alpha \cap Z' \neq \emptyset$;

d) α=(Y_1^α×Z_3)∪(Y_2^α×Z_2)∪((X\(Y_1^α∪Y_2^α))×D˘), where Y_1^α and Y_2^α are pairwise disjoint subsets of the set X that satisfy the following conditions: Z_3∩Z_2=∅, Z_3⊆Y_1^α⊆X\Z_2, Z_2⊆Y_2^α⊆X\Z_3;

e) $\alpha = (Y_1^{\alpha} \times Z_3) \cup (Y_2^{\alpha} \times Z_2) \cup ((X \setminus (Y_1^{\alpha} \cup Y_2^{\alpha})) \times D^{\breve{}})$, where Y_1^α and Y_2^α are pairwise disjoint subsets of the set X that satisfy the following conditions: $Z_3 \cap Z_2 = \emptyset, Z_3 \subseteq Y_1^{\alpha} \subseteq X \setminus Z_2, Z_2 \subseteq Y_2^{\alpha} \subseteq X \setminus Z_3$;

$$X \setminus (Y_1^{\alpha} \cup Y_2^{\alpha}) \neq \emptyset, Y_1^{\alpha} \supseteq Z, Y_1^{\alpha} \cup Y_2^{\alpha} \supseteq Z', Y_2^{\alpha} \cap Z' \neq \emptyset;$$

where Y_1^{α} and Y_2^{α} are pairwise disjoint subsets of the set X that satisfy the following conditions: $Z_3 \cap Z_2 = \emptyset$, $Z_3 \subseteq Y_1^{\alpha} \subseteq X \setminus Z_2$, $Z_2 \subseteq Y_2^{\alpha} \subseteq X \setminus Z_3$;

a) $\alpha = (Y_1^{\alpha} \times Z_4) \cup (Y_2^{\alpha} \times Z_3) \cup (Y_3^{\alpha} \times Z_1) \cup \left((X \setminus (Y_1^{\alpha} \cup Y_2^{\alpha} \cup Y_3^{\alpha})) \times \breve{D}\right)$, where Y_1^{α}, Y_2^{α} and Y_3^{α} are pairwise disjoint subsets of the set X that satisfy the following conditions: $Y_1^{\alpha} \supseteq Z_4$, $Y_1^{\alpha} \cup Y_2^{\alpha} \supseteq Z_3$, $Y_1^{\alpha} \cup Y_2^{\alpha} \cup Y_3^{\alpha} \supseteq Z_1$, $Y_2^{\alpha} \cap Z_3 \neq \emptyset$, , $Y_3^{\alpha} \cap Z_1 \neq \emptyset$;

b) Let's say that $Z = Z_3$, $Z' = Z_2$ or $Z = Z_1$, $Z' = Z_2$, then

$\alpha = (Y_1^{\alpha} \times Z_4) \cup (Y_2^{\alpha} \times Z) \cup (Y_3^{\alpha} \times Z') \cup \left((X \setminus (Y_1^{\alpha} \cup Y_2^{\alpha} \cup Y_3^{\alpha})) \times \breve{D}\right)$, where Y_1^{α}, Y_2^{α} and Y_3^{α} are pairwise disjoint subsets of the set X that satisfy the following conditions: $Y_1^{\alpha} \supseteq Z_4$, $Y_1^{\alpha} \cup Y_2^{\alpha} \supseteq Z$, $Y_1^{\alpha} \cup Y_2^{\alpha} \cup Y_3^{\alpha} \supseteq Z'$, $Y_2^{\alpha} \cap Z \neq \emptyset$, $Y_3^{\alpha} \cap Z' \neq \emptyset$.

Theorem 2. Let *X be* a finite set and *I represent* the set of all idempotent relations of the semigroup $B_X(D)$. Then for the number $|I|$ the following statements are true:

a) if $\emptyset \notin D$ (i. e. $Z_4 \neq \emptyset$), then

$$|I| = 5 + \left(2^{|Z_3 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot 2^{|X \setminus Z_3|} + \left(2^{|Z_2 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot 2^{|X \setminus Z_2|} + \left(2^{|Z_1 \setminus Z_4|} + 2^{|Z_1 \setminus Z_3|} - 2\right) \cdot 2^{|X \setminus Z_1|} + \left(2^{|\breve{D} \setminus Z_4|} + 2^{|\breve{D} \setminus Z_3|} + 2^{|\breve{D} \setminus Z_2|} + 2^{|\breve{D} \setminus Z_1|} - 4\right) 2^{|X \setminus \breve{D}|} + \left(2^{|Z_3 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot \left(3^{|Z_1 \setminus Z_3|} - 2^{|Z_1 \setminus Z_3|}\right) 3^{|X \setminus Z_1|} + \left(\left(2^{|Z_3 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot \left(3^{|\breve{D} \setminus Z_3|} - 2^{|\breve{D} \setminus Z_3|}\right) + \left(2^{|Z_2 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot \left(3^{|\breve{D} \setminus Z_2|} - 2^{|\breve{D} \setminus Z_2|}\right) + \left(2^{|Z_1 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot \left(3^{|\breve{D} \setminus Z_1|} - 2^{|\breve{D} \setminus Z_1|}\right) + \left(2^{|Z_1 \setminus Z_3|} - 1\right) \cdot \left(3^{|\breve{D} \setminus Z_1|} - 2^{|\breve{D} \setminus Z_1|}\right)\right) \cdot 3^{|X \setminus \breve{D}|} + \left(2^{|Z_3 \setminus Z_4|} - 1\right) \left(3^{|Z_1 \setminus Z_3|} - 2^{|Z_1 \setminus Z_3|}\right) \cdot \left(4^{|\breve{D} \setminus Z_1|} - 3^{|\breve{D} \setminus Z_1|}\right) 4^{|X \setminus \breve{D}|} + \left(\left(2^{|Z_3 \setminus Z_2|} - 1\right) \cdot \left(2^{|Z_2 \setminus Z_3|} - 1\right) + \left(2^{|Z_1 \setminus Z_2|} - 1\right) \cdot \left(2^{|Z_2 \setminus Z_1|} - 1\right)\right) \cdot 4^{|X \setminus \breve{D}|}.$$

b) if $\emptyset \in D$ (i. e. $Z_4 = \emptyset$), then

$$|I| = 1 + \left(2^{|Z_3 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot 2^{|X \setminus Z_3|} + \left(2^{|Z_2 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot 2^{|X \setminus Z_2|} + \left(2^{|Z_1 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot 2^{|X \setminus Z_1|} + \left(2^{|\breve{D} \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot 2^{|X \setminus \breve{D}|} + \left(2^{|Z_3 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot \left(3^{|Z_1 \setminus Z_3|} - 2^{|Z_1 \setminus Z_3|}\right) \cdot 3^{|X \setminus Z_1|} + \left(\left(2^{|Z_3 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot \left(3^{|\breve{D} \setminus Z_3|} - 2^{|\breve{D} \setminus Z_3|}\right) + \left(2^{|Z_2 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot \left(3^{|\breve{D} \setminus Z_2|} - 2^{|\breve{D} \setminus Z_2|}\right)\left(2^{|Z_1 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot (3^{|D^{\breve{}} \setminus Z_1|} - 2^{|D^{\breve{}} \setminus Z_1|}) \cdot 3^{|X \setminus D^{\breve{}}|} + \left(2^{|Z_3 \setminus Z_4|} - 1\right) \cdot \left(3^{|Z_1 \setminus Z_3|} - 2^{|Z_1 \setminus Z_3|}\right) \cdot \left(4^{|\breve{D} \setminus Z_1|} - 3^{|\breve{D} \setminus Z_1|}\right) \cdot 4^{|X \setminus \breve{D}|} + \left(\left(2^{|Z_3 \setminus Z_2|} - 1\right) \cdot \left(2^{|Z_2 \setminus Z_3|} - 1\right) + \left(2^{|Z_1 \setminus Z_2|} - 1\right) \cdot \left(2^{|Z_2 \setminus Z_1|} - 1\right)\right) \cdot 4^{|X \setminus \breve{D}|}.$$

Let us introduce the notation: let $G_X(D, \varepsilon)$ denote the maximal subgroup of the semigroup $B_X(D)$, which identity element ε represents the idempotent binary relation of the semigroup $B_X(D)$.

Theorem 3. For any idempotent binary relation ε of the semigroup $B_X(D)$, the subgroup $G_X(D, \varepsilon)$ of the semigroup $B_X(D)$ is a group which order does not exceed two.

CONCLUSION

From the above-mentioned we may conclude that digital technologies have brought changes to the nature and scope of education. Given that the integration of digital technologies is a complex and continuous process that impacts different actors within the education ecosystem, there is a need to show how these impacts are interconnected and identify the factors that can encourage an effective and efficient change in the education environments. The greatest difficulty is the transition from information circulating in the training system to independent practical actions and deeds, in other words, from a sign system as a form of information presentation on the pages of a textbook, a monitor screen, etc. to a system of practical actions performed on the basis of knowledge and having a fundamentally different logic than the logic of organizing a semiotic system. This is the classic problem of applying knowledge in practice, and in axiological language - the problem of the transition from worldview thought to relevant valuable action.

References:

1. Adriaans Pieter, Information, Stanford Encyclopedia of Philosophy, First published February 26, 2012; Substantive revision November 1, 2023. - URL:

https://plato.stanford.edu/entries/information/

2. Bagrationi Irma, For the Ethical Problems of Digital Education in Decision-Making Process, Proceedings of International Scientific Conference: PDMU-2023-XXXVIII - "Problems of Decision Making under Uncertainties", Kiev: "Видавництво Людмила", 2023. pp. 16-18. - URL: http://www.pdmu.univ.kiev.ua/PDMU_2023/PDMU-2023_End.pdf

3. Didmanidze I., Bagrationi I., Ulanov V., Matrosova N., Chargazia G., The Ethical Transformations of the Technological Systems For Digital Education Management, Proceedings of the conference: DTMIS'2020_Digital Transformation on Manufacturing, Infrastructure and Service", New York, 2021. - Article № 69, pp. 1-7. DOI: https://doi.org/10.1145/3446434.3446456

4. Didmanidze I., Bagrationi I., the Issue of Student Distance Communication and Collaboration, the Journal "Cross-Cultural Studies: Education and Science (CCS&ES)", Volume 3, Issue I, Vermont, 2018, Pp. 6-19. - URL: http://j-ccses.org/wp-content/uploads/2018/06/Issue-1-2018.pdf

5. Murrell Paul, Introduction to Data Technologies, First Edition, UK: "Chapman & Hall", 2009. - URL: https://www.stat.auckland.ac.nz/~paul/ItDT/itdt-2019-03-06.pdf

Наукове видання

Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Моделювання, керування та інформаційні технології»

Відповідальний за випуск *Андрій Сафоник*

Технічний редактор *Галина Сімчук*

Підготовлено до друку *Басюк Тетяна*

Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.