



**MCIT**  
Modeling, control &  
information technologies

2024

VII International Scientific-  
Practical Conference  
November 7-9, Rivne, Ukraine

**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»  
Інститут прикладних проблем механіки і математики  
ім. Я.С. Підстригача НАН України  
Наукове товариство імені Шевченка  
Академії наук вищої школи України  
Інститут механіки і прикладної інформатики університету Казимира Великого в  
Бидгощі (Польща)  
Люблінська Політехніка (Польща)  
Вроцлавська Політехніка (Польща)  
Університет Ньюкасла (Велика Британія)  
Університет Павла Йозефа Шафарика в Кошице (Словаччина)  
Чеський технічний університет в Празі (Чеська Республіка)



***«Моделювання, керування та інформаційні  
технології»***

**VII МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ**

7–9 листопада 2024  
Рівне, Україна

***Матеріали конференції***

Рівне  
2024

**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  
Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of  
NAS of Ukraine  
Shevchenko Scientific Society  
Academy of Sciences of the Higher School of Ukraine  
Institute of Mechanics and Applied Computer Science of Kazimierz Wielki University in  
Bydgoszcz (Poland)  
Lublin University of Technology (Poland)  
Wroclaw University of Science and Technology (Poland)  
Newcastle University (Great Britain)  
Pavol Jozef Šafárik University in Košice (Slovakia)  
Czech Technical University in Prague (Czech Republic)**



***«Modeling, control and information technologies»***

**VII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE**

7–9 November 2024  
Rivne, Ukraine

***Conference materials***

Rivne  
2024

ISBN 978-966-327-611-3

ISSN 2707-1049 (Online)

ISSN 2707-1030 (Print)

## МІЖНАРОДНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Мошинський Віктор (Україна)

Кушнір Роман (Україна)

Бомба Андрій (Україна)

Сафоник Андрій (Україна)

Мартинюк Петро (Україна)

Агратіні Октавіан (Romania)

Білкова Ева (Czech Republic)

Бігун Ярослав (Україна)

Бурдук Анна (Poland)

Волошук Володимир (Україна)

Воробель Роман (Україна)

Вуйцік Вальдемар (Poland)

Гамзе Гюрзой (USA)

Герасімов Євгеній (Україна)

Квасніков Володимир (Україна)

Гордійчук Павло (USA)

Грицюк Петро (Україна)

Дідманідзе Ібраїм (Georgia)

Древецький Володимир (Україна)

Качмарек Маріуш (Poland)

Когут Петро (Україна)

Комада Павел (Poland)

Крстіч Драгана (Serbia)

Кубік Юзеф (Poland)

Литвиненко Володимир (Україна)

Ляшко Сергій (Україна)

Мазурек Павел (Poland)

Наконечний Олександр (Україна)

Нагарая Шішір (Great Britain)

Новак Петр (Czech Republic)

Пасічник Володимир (Україна)

Паталяс-Малішевська Юстина (Poland)

Річ Лі (Taiwan)

Роск Ізабела (Poland)

Рябенко Олександр (Україна)

Сабзієв Ельхан (Azerbaijan)

Савіна Наталія (Україна)

Сидор Андрій (Україна)

Тадєєв Петро (Україна)

Трофимчук Олександр (Україна)

Турбал Юрій (Україна)

Федорчук Володимир (Україна)

Цешко Мечислав (Poland)

Черлінка Василь (Slovak Republic)

Чачанідзе Гурам (Georgia)

Чертов Олег (Україна)

Шаховська Наталія (Україна)

## ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Сафоник Андрій, Мартинюк Петро, Басюк Тетяна, Галич Оксана, Присяжнюк Олена,  
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  
29 листопада 2024 р., протокол № 11.

Моделювання, керування та інформаційні технології : матеріали VII Міжнародної  
науково-практичної конференції. – Рівне : Національний університет водного  
господарства та природокористування, 2024. – 367 с.

ISBN 978-966-327-611-3

© Національний університет водного  
господарства та природокористування, 2024



ISBN 978-966-327-611-3

ISSN 2707-1049 (Online)

ISSN 2707-1030 (Print)

#### INTERNATIONAL PROGRAM COMMITTEE

**Moshynskiy Viktor** (Ukraine)  
**Kushnir Roman** (Ukraine)  
**Bomba Andrii** (Ukraine)  
**Safonyk Andrii** (Ukraine)  
**Martyniuk Petro** (Ukraine)  
**Agratini Octavian** (Romania)  
**Bílková Eva** (Czech Republic)  
**Bigun Yaroslav** (Ukraine)  
**Burduk Anna** (Poland)  
**Voloshchuk Volodymyr** (Ukraine)  
**Vorobel Roman** (Ukraine)  
**Wójcik Waldemar** (Poland)  
**Gamze Gürsoy** (USA)  
**Gerasimov Ievgenii** (Ukraine)  
**Kvasnikov Volodymyr** (Ukraine)  
**Gordiichuk Pavlo** (USA)  
**Hrytsiuk Petro** (Ukraine)  
**Didmanidze Ibrahim** (Georgia)  
**Drevetskyi Volodymyr** (Ukraine)  
**Kaczmarek Mariusz** (Poland)  
**Kogut Peter** (Ukraine)  
**Komada Paweł** (Poland)  
**Krstić Dragana** (Serbia)  
**Kubik Józef** (Poland)

**Lytvynenko Volodymyr** (Ukraine)  
**Lyashko Serhiy** (Ukraine)  
**Mazurek Paweł** (Poland)  
**Nakonechnyi Oleksandr** (Ukraine)  
**Nagaraja Shishir** (Great Britain)  
**Nowak Petr** (Czech Republic)  
**Pasichnyk Volodymyr** (Ukraine)  
**Patalas-Maliszewska Justyna** (Poland)  
**Rich C. Lee** (Taiwan)  
**Rojek Izabela** (Poland)  
**Riabenko Oleksandr** (Ukraine)  
**Sabziev Elkhan** (Azerbaijan)  
**Savina Natalia** (Ukraine)  
**Sydor Andriy** (Ukraine)  
**Tadeev Petro** (Ukraine)  
**Trofimchuk Oleksandr** (Ukraine)  
**Turbal Yurii** (Ukraine)  
**Fedorchuk Volodymyr** (Ukraine)  
**Cieszko Mieczysław** (Poland)  
**Cherlinka Vasyl** (Slovak Republic)  
**Chachanidze Guram** (Georgia)  
**Chertov Oleg** (Ukraine)  
**Shakhovska Natalia** (Ukraine)

#### ORGANIZING COMMITTEE OF CONFERENCE

**Safonyk Andrii, Martyniuk Petro, Basiuk Tetiana, Halych Oksana, Prysiazhniuk Olena, Khrystiuk Andrii, Sunichuk Serhii**

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

Conference materials have been reviewed and accepted for publication by the Academic Council of the National University of Water and Environmental Engineering on November 29, 2024, Academic Council Meeting Minutes #11.

Modeling, control and information technologies : Materials of VII International scientific and practical conference. – Rivne : National University of Water and Environmental Engineering, 2024. – 367 p.

ISBN 978-966-327-611-3

© National University of Water and Environmental Engineering, 2024



## СЕКЦІЯ 1

### ГІДРОІНФОРМАТИКА ТА УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ

*Gulchin Abdullayeva G., Gidayatzada Sayyara G.*

Intelligent Information System for Monitoring the Quality of Drinking Water..... 15

*Korniichuk Volodymyr, Shumlyanskyj Andrii*

The Possibility of Local Soils Use for Levees Construction as Part of Flood Protection..... 19

*Turchenyuk Vasyl, Prykhodko Natalia, Koziskurt Svitlana, Voitsekhovych Nazarii*

Modeling and evaluation of the effectiveness of the operation of Danube rice irrigation systems taking into account environmental requirements..... 22

*Волк Любов, Довбенко Іванна, Безусяк Олександр*

Аналіз існуючих досліджень коефіцієнта гідравлічного опору в трубах..... 25

*Мельничук Інна*

Класифікація рибопропускних споруд..... 28

*Приходько Наталія, Рокочинський Анатолій, Волк Павло*

Необхідність та принципи удосконалення методів і засобів планування водокористування при зрошенні..... 31

*Ромащенко Євген, Онопко Олександр, Волк Павло, Рокочинський Анатолій*

Удосконалення технології проектування дренажних систем відповідно до сучасних змінюваних умов та вимог..... 36

*Стефанишин Дмитро, Корбутяк Василь, Бенатов Данило*

До питання вибору способу відновлення використання водних ресурсів та втраченого гідроенергетичного потенціалу в межах колишнього Каховського..... 39

*Токар Людмила, Панасюк Ілона, Богельський Станіслав*

Вплив захисного фільтруючого матеріалу на водоприймальну здатність дренажних осушувально-зволожувальних систем у торфових ґрунтах..... 43

*Чернявський Богдан*

Гідроінформатика як акселератор прийняття рішень в управлінні ремедіацією водних ресурсів: інноваційна агентно-орієнтована модель для Херсонщини..... 46

*Шинкарук Любомир, Хланук Микола, Волк Любов*

Обґрунтування вибору конструкції водозабірної споруди в складі протипаводкового комплексу на основі фізичного моделювання..... 50

*Чернюк Володимир, Бігун Ірина, Іванів Василь, Фасуляк Вадим, Литвин Віталій*

Спосіб регулювання притоку рідини до напірних трубопроводів-збирачів за наявності транзитної витрати..... 55

## СЕКЦІЯ 2 ЕНЕРГЕТИКА ТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

<b><i>Boiko Bogdan, Iryna Protcyk</i></b> Classification Model for Effective Employee Segmentation.....	60
<b><i>Boyko Nataliya, Petunin Heorhii</i></b> Analysis of the Impact of External Factors on the Air Quality Index: a Machine Learning Approach.....	62
<b><i>Halych Oksana, Nowak Petr, Bilková Eva</i></b> Using computer modeling during the design and reconstruction of hydropower facilities.....	65
<b><i>Nowak Petr, Bilková Eva</i></b> Use of CFD for optimisation of hydraulic structures and hydropower plants.....	68
<b><i>Stefanyshyn Dmytro</i></b> Prospects for Small Hydropower in Ukraine in the Context of Feasibility and Environmental Impact: Summarising after the World Small Hydropower Development Report 2022.....	71
<b><i>Басюк Тетяна</i></b> Гідроекологічні аспекти реконструкції малих ГЕС (на прикладі р. Південний Буг).....	75
<b><i>Богущ Олександр</i></b> Аналіз взаємодії сонячної електростанції для підвищення ефективності роботи Дністровської ГАЕС.....	79
<b><i>Василець Святослав, Василець Катерина, Ільчук Володимир</i></b> Оцінювання точності вузла обліку електроенергії при зниженому струмі навантаження.....	81
<b><i>Волощук Володимир, Богза Микола</i></b> Підходи до інтеграції нейронних мереж у MATLAB для задач моделювання теплонасосних установок.....	83
<b><i>Волянський Володимир, Глущенко Олексій</i></b> Інноваційні алгоритми цифрових пристроїв РЗА для трансформації українських розподільчих електромереж.....	86
<b><i>Галат Вадим, Крайник Вадим</i></b> Коригування проекту Канівської ГАЕС з урахуванням сучасних вимог енергосистеми України та захисту споруд.....	88
<b><i>Герба Олександр</i></b> Експериментальні дослідження моделей турбін малих гідроелектростанцій.....	91

<b>Зайчук Роман</b> Дослідження ефекту підтоплення трапецієвидних водомірів за допомогою автоматизованої системи вимірювань .....	95
<b>Крайник Вадим, Ландау Юрій, Шевчик Олександр</b> Дністровський багатоцільовий комплексний енерговузол.....	99
<b>Мельничук Віктор, Басюк Тетяна, Криницька Марія, Косяк Діана</b> Проект захоронення радіоактивних відходів Хмельницької АЕС в товщі вулканічних туфів .....	102
<b>Мошинський Віктор, Бондаренко Юрій, Рябенко Олександр, Тимощук Володимир, Ключа Оксана</b> Роль гідроенергетики в роботі об'єднаної енергетичної системи України в сучасних умовах .....	106
<b>Рябенко Олександр, Попруга Павло, Поплавський Дмитро</b> Математичне моделювання гідравлічних режимів водного потоку низьконапірних ГЕС з використанням ріннянь Сен-Венана .....	110
<b>Сунічук Сергій, Осніцький Тарас, Курган Микола</b> Автоматизована система контролю безпеки гідротехнічних споруд Київської ГАЕС.....	114
<b>Філіпович Юрій, Стельмах Назарій</b> Моделювання режимів роботи вакуумних систем автоматизованих насосних станцій.....	117

### СЕКЦІЯ 3 ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<b>Bomba Andrii, Moroz Igor, Listiev Zakhar</b> Development of a software architecture concept for solving singularly perturbed problems in semiconductor electronics.....	121
<b>Borysiuk Viktor, Michuta Olha</b> Application of Quantum Computing in Optimization Problems.....	123
<b>Kochura Vitalii, Loktikova Tamara, Kushnir Nadia</b> Hotel and accommodation booking management platform for travel in Ukraine.....	125
<b>Kovalov Yurii</b> Authentication and authorization in microservice oriented application design.....	128
<b>Samoidiuk Andrii, Ostapchuk Oksana</b> Optimizing High-Load Systems with Asynchronous Programming Techniques.....	130
<b>Tsypliak Oleksandr, Artemchuk Volodymyr</b> Generative AI text summarization performance analysis prospects.....	132

<b><i>Turbal Yurii, Kushnir Igor</i></b> The Case for Asynchronous Language Support API in an Integrated Development Environment.....	136
<b><i>Дутчак Ольга, Краснокутська Інесса, Мартинюк Ольга</i></b> Автоматизоване тестування сайту факультету з використанням Cypress.....	140
<b><i>Красько Богдан, Грицюк Петро</i></b> Особливості архітектури Amazon EC2 для масштабування обчислювальних ресурсів	142
<b><i>Крук Роман, Жуковська Наталія</i></b> Дотримання RMS інструментами вимог якості SRS та дизайн комплементарної системи.....	144
<b><i>Ляшук Тарас</i></b> Java 23: нові можливості та вдосконалення.....	148
<b><i>Рейнська Вікторія, Мотова Тетяна</i></b> Мобільний додаток для сервісу догляду за домашніми тваринами: моделювання та управління.....	150
<b><i>Рейнська Вікторія, Колесник Марія</i></b> Інформаційні технології у вирішенні проблем фіскалізації підприємств: дослідження електронного кабінету платників.....	152
<b>СЕКЦІЯ 4</b>	
<b>ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (ІоТ) ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ</b>	
<b><i>Diahyleva Olena, Yurzhenko Alona, Kononova Olena</i></b> Utilizing Datasland to Create Interactive Maritime English Exercises.....	155
<b><i>Klimov Serhii, Starovoit Tetiana</i></b> A hybrid AI model for forecasting electricity volume to optimize water supply company efficiency.....	159
<b><i>Melnyk Vasyl, Melnyk Halyna</i></b> Enhancing Mood and Energy Detection in NLP through Fuzzy Logic Integration.....	165
<b><i>Pavliuk Vitalii, Drevetskyi Volodymyr</i></b> Intelligent Employer Matching System for Young Professionals and Students Based on Multifactor Analysis.....	169
<b><i>Serhiienko Ihor</i></b> Kolmogorov-Arnold Neural Network's optimization and architecture analysis	172
<b><i>Zelinskyi Serhii, Boyko Yuriy</i></b> Facial Blendshapes for Custom Action: An Experimental Evaluation Using Facial Expressions for Human-Computer Interaction.....	174
<b><i>Головчук Юлія, Каштан Сергій</i></b> Інтеграція інтернету речей та штучного інтелекту у концепції розумних міст.....	177



**Данильчук Марія, Королюк Тетяна**  
Державна політика зайнятості населення в епоху штучного інтелекту..... 180

**Рейнська Вікторія, Лопатіна Діана**  
Мобільний додаток для психологічної підтримки військових:  
штучний інтелект як помічник у реабілітації та адаптації..... 183

**Трофимчук Олександр, Королюк Дмитро, Крисенко Павло**  
Прогнозування коефіцієнту проникнення метаматеріалу за його  
структурою та параметрами електромагнітного опромінення..... 186

## СЕКЦІЯ 5 КІБЕРНЕТИЧНА ТА ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКА

**Лурка Yurii**  
Paradigm shifts in cybersecurity: a convergence of artificial intelligence,  
quantum computing, and neuromorphic systems..... 190

**Pinchuk Alla, Polihenko Oleh, Odarchenko Roman**  
A Novel Approach to Cybersecurity Threats Classification by its Nature..... 192

**Кардаш Оксана, Гладун Любомир**  
Інституційні механізми забезпечення кібербезпеки в Європейському Союзі..... 196

**Каштан Наталія**  
Використання нейроморфних обчислень для виявлення та запобігання  
кіберзагроз у комп'ютерних мережах..... 198

**Курчак Кирило, Рейнська Вікторія**  
Сучасні методи захисту веб-сайту..... 200

**Новосьолов Дмитро**  
Моделювання кібер інцидентів в мультиагентному середовищі NetLogo..... 203

**Перкальова Валерія, Королюк Тетяна**  
Економічна політика розвитку ІТ-сфери: досвід Китайської Народної  
Республіки та українські реалії..... 205

**Поліщук Максим**  
Використання методів захисту даних в системах безпеки Unity застосунків..... 208

**Сус Василь**  
Аналіз моделі прогнозування кіберзагроз «Cyber Kill Chain»..... 210

**Тулашвілі Юрій, Лук'ячук Юрій**  
Алгоритми Консенсусу у Blockchain Корпоративних Системах..... 212

**СЕКЦІЯ 6**  
**МАТЕМАТИЧНЕ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА**  
**ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ**

<b><i>Alyokhina Svitlana, Orlova Natalia, Pidhornyi Anatolii</i></b> Framework for Dataset Development in Building Energy Balance Simulations.....	217
<b><i>Anikushyn Andrii, Nazarchuk Viktoria</i></b> Point Optimal Control of Pseudoparabolic Systems with Memory.....	221
<b><i>Bihun Yaroslav, Ukrainets Oleh</i></b> Mathematical modeling of the body's immune response to infectious disease with external factors.....	223
<b><i>Bomba Andrii, Moroz Igor</i></b> Perturbation Theory Methods for the Semiconductor Plasma Diode Simulation.....	225
<b><i>Cherhykalo Denys</i></b> The problem of aging as a problem of the appearance of unstable components when detailing the system.....	230
<b><i>Datsyshyn Serhii, Michuta Olha</i></b> Problems of developing an expert system for industrial fish farming under martial law conditions.....	232
<b><i>Didmanidze Ibraim, Tsitskishvili Givi, Didmanidze Didar, Zaslavsky Vladimir</i></b> Digital education: Data technologies and informative knowledge.....	233
<b><i>Drozd Vasyl, Michuta Olha</i></b> Problems of automating the use of land resources by local government under martial law...	235
<b><i>Gayvas Bogdana, Dmytruk Anatolii</i></b> Convective-thermal drying simulation to reduce the damage of the grain in convective plants.....	237
<b><i>Grydzhuk Yaroslav, Slabyi Orest, Kondur Taras</i></b> Assessment of dynamic contact of the bent part of the drill string with t he wall of the directed well.....	241
<b><i>Kogut Peter</i></b> On optimal sparse control formulation for reconstruction of noise-affected images.....	243
<b><i>Koshmanenko Volodymyr, Satur Oksana</i></b> Point spectrum as a profile of beliefs in conflict models.....	244
<b><i>Krasilenko Vladimir, Nikitovich Diana, Lazarev Alexander</i></b> Modeling Nodes and Cells of NeuronEquivalentors as Accelerators of EquivalentalConvolutional Self-Learning Neural Structures.....	247

<b><i>Lytvynenko Volodymyr, Mrykhin Andrii, Antoshuk Svitlana, Savina Nataliya, Marchuk Oleh</i></b> Applying the Monte Carlo Method for Modeling Order Fulfillment with Consideration of Supply Risk	251
<b><i>Martyniuk Petro, Ivanchuk Natalia, Shostak Lyubov, Shayniuk Kostyantyn</i></b> Computer modeling of water purification in bioplateau taking into account biodegradation processes and greenhouse gas emissions.....	258
<b><i>Nabadova Gulush, Elkhan Sabziev</i></b> Ensuring Straight-Line Motion of the Hexacopter in Case of One Engine Failure.....	260
<b><i>Prokip Volodymyr</i></b> On solvability of the matrix equation $AX+YB=C$ over principal ideal domains.....	264
<b><i>Sandrakov Gennadiy</i></b> Modeling of Filtration Processes with Extended Sources and Homogenization.....	268
<b><i>Shostak Liubov</i></b> Modification of the filtration consolidation equation and kinematic boundary condition into the case of biodegradation processes.....	270
<b><i>Thea Camille-Maxime, Belozerova Olena</i></b> Integrating CNN-BiLSTM Architecture for Predicting Precipitation and Meteorological Patterns.....	274
<b><i>Білушак Юрій, Чернуха Ольга, Чучвара Анастасія</i></b> Математична модель очищення забрудненого розчину і пом'якшення води з врахуванням експериментальних даних на границі фільтра.....	277
<b><i>Бомба Андрій, Кушнір Олекса</i></b> Модифікація задачі Д. Гільберта при моделюванні процесів повільного руху рідин з перетоками.....	282
<b><i>Бомба Андрій, Каштан Сергій</i></b> Математичне моделювання одного класу фільтраційних і гідравлічних процесів.....	284
<b><i>Бомба Андрій, Шатний Сергій, Бойчура Михайло, Багнюк Ольга, Іванчук Наталія</i></b> Ідентифікація координат імпульсних джерел забруднень стічних вод в кусково-однорідних середовищах числовими методами квазіконформних відображень.	288
<b><i>Ванін Віктор, Лебідь Олексій, Черній Дмитро</i></b> Обчислювальні технології для нелокальних початково-крайових задач гідромеханіки...	290
<b><i>Гриджук Ярослав, Михайлів Андрій, Михайлів Роман</i></b> Аналіз моделей оцінки довговічності талевих канатів бурових установок.....	292
<b><i>Івохін Євген, Юштин Костянтин, Улесв Андрій</i></b> Спосіб формалізації та метод розв'язання багатокритеріальної задачі комівояжера.....	294

<b>Клюшин Дмитро, Ляшко Сергій, Тимошенко Андрій</b> Оптимальне керування переносом вологи у трапецієвидному пористому середовищі...	297
<b>Мартинюк Петро, Мічута Ольга, Остапчук Оксана, Мельничук Олег</b> Математична модель нелінійної неізометричної фільтрації з умовами спряження.....	300
<b>Маценко Василь</b> Існування періодичних режимів в моделі типу Скеллама.....	304
<b>Покутний Олександр, Панасенко Євген</b> Умови розв'язності для зв'язаної системи нелінійних операторних рівнянь Сільвестра у гільбертовому просторі.....	306
<b>Приймак Микола</b> Ряди Фур'є періодичних функцій зі змінним періодом.....	309
<b>Приймак Микола, Готович Володимир, Кохан Василь.</b> Інформаційно-вимірювальна система оцінки змінного періоду.....	311
<b>Сафоник Андрій, Полюхович Сергій, Грицюк Володимир</b> Ідентифікація домішкових компонент у процесі магнітного фільтрування рідких середовищ.....	314
<b>Сафоник Андрій, Полюхович Олена, Рогов Олег, Ковальчук Наталія</b> Ідентифікації масообмінного коефіцієнта у процесах очищення рідких середовищ від багатокomпонентного забруднення.....	318
<b>Семенов Володимир, Коваленко Олександра, Чергикало Денис</b> Збіжність методу операторної екстраполяції для варіаційних нерівностей.....	322
<b>Сохацький Анатолій</b> Математичне моделювання транспортних потоків дорожньої мережі на основі гідродинамічної аналогії.....	325
<b>Черевко Ігор, Щур Тетяна, Диренко Віктор</b> Числове моделювання диференціальних рівнянь із запізненням.....	329

## СЕКЦІЯ 7

### РОБОТОТЕХНІКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КЕРУВАННЯ

<b>Akhundov Ramil</b> Environmental Warfare – Modern Global Challenge.....	332
<b>Bayramov Azad, Suleymanov Samir, Abdullaev Fatali</b> The Unmanned Robotic Complex For The Small Arms Fire Evaluation.....	336
<b>Fedoryshyn Roman, Lymych Vasyl</b> Analysis of Methods for Controlling Ball Drum Mills at Hard Materials Grinding.....	340

<b><i>Khrystyuk Andriy, Cherniuk Oleksandr</i></b> From Control Loss to Autonomous Operation: Failsafe Strategies for Modern UAVs.....	342
<b><i>Бомба Андрій, Кот Василь</i></b> Задача швидкодії одноланкового робота-маніпулятора з урахуванням малого впливу демпферних елементів.....	344
<b><i>Вечер В'ячеслав, Реут Дмитро</i></b> Дослідження доцільності використання технології орнітоптера та розробка системи керування польотом.....	346
<b><i>Донець Роман, Музиченко Адріан</i></b> Шляхи вдосконалення навігаційних систем для безпілотних літальних апаратів.....	349
<b><i>Ільчук Володимир, Глушук Владислав</i></b> Моделювання імовірності відмови автоматичного газового захисту шахти.....	351
<b><i>Мандзюк Роман, Древецький Володимир, Реут Дмитро</i></b> Експериментальне дослідження цифрової системи випробовування високовольтних вимикачів.....	353
<b><i>Сафоник Андрій, Таргоній Іван, Пилипенко Володимир</i></b> Розробка системи моніторингу та контролю процесу відведення фільтраційних вод від земляних гребель.....	355
<b><i>Сафоник Андрій, Таргоній Іван, Трохимчук Максим, Ластовецький Дмитро</i></b> Оптимізація системи регулювання витрати стічних вод в абсорбційно-біохімічній установці.....	357
<b><i>Сельоткін Владислав, Волощук Володимир</i></b> Визначення дефектів на друкованих електричних платах методом навчання без підкріплення.....	357
<b><i>Христюк Андрій, Литвиненко Олексій</i></b> Аналіз можливостей налаштування системи керування двигунами безпілотного апарату на основі ПД регулятора.....	362





***СЕКЦІЯ 1***  
***ГІДРОІНФОРМАТИКА ТА УПРАВЛІННЯ***  
***ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ***

# *Intelligent Information System for Monitoring the Quality of Drinking Water*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.001>

Gulchin Abdullayeva G.  
Institute of Control Systems of MSERA,  
Baku, Azerbaijan  
[gulchinabdullayeva1947@gmail.com](mailto:gulchinabdullayeva1947@gmail.com)

Gidayatzada Sayyara G  
Institute of Cybernetics of MSERA,  
Baku, Azerbaijan  
[seyyarehidayetzade@isi.az](mailto:seyyarehidayetzade@isi.az)

**Abstract** – The article explores the global issue of water scarcity. Methods are being applied to eliminate water pollution, which can lead to water shortages. Azerbaijan is also one of the countries suffering from this problem. A global approach to the issue is required. Considering the complexity of the problem, a prototype is being developed, and potential solutions are demonstrated on it. The JWR is taken as the prototype object. The conceptual model, functional model, and system architecture have been presented.

**Keywords** – ecological safety, drinking water, norm bases, functional model, conceptual model.

## I. INTRODUCTION

Recently, two parallel but distinct problems have been emerging in the world: on one hand, large parts of the Earth's surface are becoming submerged due to rising water levels, and on the other, there's a growing issue of water scarcity. The global drought, along with the pollution of water sources, is leading to a reduction in water reserves, causing water shortages and disrupting the natural water cycle. Climate variability in recent years, water consumption by agriculture, industrial waste, and similar factors also contribute to water shortages and even the depletion of water sources. Mismanagement of water resources, improper distribution, or water pollution all play a part in exacerbating the shortage of drinking water. To combat these issues, effective and sustainable water management, the careful use of water resources, and prevention of water pollution are necessary steps. International cooperation plays a significant role in addressing water-related problems.

This issue arises from various causes, such as urbanization and population growth, climate change, water pollution, insufficient infrastructure, water management, and legislation. According to UN reports, currently, one in ten people on the planet suffers from water scarcity. It is predicted that by 2050, global demand for water will increase by 70%.

Azerbaijan is also among the countries facing fresh water shortages. Only 10% of the fresh water resources in the South Caucasus region fall within our share. The country's drinkable water reserves are limited and unevenly distributed. Currently, the surface water

resources of the country amount to 30-31 km<sup>3</sup>, but during dry years, this figure can drop to as low as 20.3 km<sup>3</sup>. Experts link the decrease in the flow of the Kura River to climate change, reduced precipitation, and an increase in the number of dry days.

The Oghuz-Gabala-Baku water pipeline holds great significance. First of all, a large volume of clean drinking water is delivered to Baku. The majority of Azerbaijan's water resources are formed in foreign countries, but the Oghuz-Gabala-Baku pipeline is a major project built solely on local sources. The construction of this project started almost immediately after the country began receiving its first oil revenues. Experts now acknowledge that if the Oghuz-Gabala-Baku pipeline did not exist today, Baku's water problems would be far more severe.

In addition, it is worth mentioning the construction of the historic Takhtakorpu reservoir. This reservoir has a significant water storage capacity—270 million cubic meters. Moreover, a new concrete canal has been constructed from the Takhtakorpu reservoir to the Jeyranbatan reservoir. The special importance of the Takhtakorpu reservoir lies in the fact that the waters of the Samur River are collected there, naturally purified, and then sent to the Jeyranbatan reservoir from a new reservoir. Previously, water from the Samur River flowed directly through a canal to Jeyranbatan. Without this large water body, providing Baku with drinking water would be impossible today. This is undeniable. Therefore, a lot of work has been done for the fair distribution of the Samur River's waters and for the execution of this project. At the same time, this project has significantly increased the irrigated lands in Shabran, Siyazan, and Khizi regions, providing water to approximately 30,000 hectares of previously unirrigated land, where extensive agricultural work is now being carried out.

The problem isn't only the scarcity of water, but also the high level of pollution in the water entering the country. The rivers entering Azerbaijan from Georgia and Armenia are dangerously polluted. While the rivers are clean in Turkey, they become highly contaminated as they pass through Georgian and Armenian territories. Untreated sewage and industrial waste from Georgia and Armenia flow into the Kura and Araz rivers. The pollution is so extensive that the rivers cannot naturally purify themselves.

One of the major threats to national security is the risk of contamination of drinking water.

Currently, the impact of global problems on politics and international relations is growing stronger. In interstate relations, environmental pollution and control over water resources play a crucial role. These factors have turned into political tools for exerting pressure between countries. In this context, the issue of drinking water has become an important component in today's political relations. A concept known as "water diplomacy" has emerged on the international stage, referring to the use of water resources as a political tool for pressure.[1]

An example of this can be seen in Armenia's occupation of the Sarsang reservoir, which is being used as an instrument of ecological pressure against our regions.

There are a total of 24 reservoirs in Karabakh, of which 3 are in a critical condition. Out of the 22 reservoirs designated for irrigation purposes, 7 are also used for fishing. Additionally, 2 reservoirs serve as sources of energy.

From the information provided above, it is clear that controlling and ensuring the safety of drinking water in the country necessitates the creation of a unified management system. This issue has a global dimension, and addressing it requires the involvement of a large number of specialists and resources. The development of such systems typically begins with the creation of a prototype. In this case, the Jeyranbatan Reservoir (which plays a significant role in the drinking water supply of the Absheron Peninsula) is considered as the prototype.

## II. PROBLEM STATEMENT

Ensuring the ecological safety of strategic facilities like reservoirs depends directly on their protection (as physical structures), the monitoring of water input/output parameters, laboratory analyses, and expert evaluations. The goal of this work is to create a centralized management system to oversee these functions.

## III. PROBLEM SOLUTION

To protect water resources from pollution and depletion, all water users must comply with the following general rules based on water legislation:

- Must not harm the environment and natural objects, nor violate the rights of other water users;
- Should use water resources efficiently and economically, continuously improving the water quality;
- Must always maintain purification facilities in good working order and enhance their efficiency;

- Take measures to completely eliminate the discharge of wastewater containing pollutants into water resources;

- Account for and analyze the quantity and quality of used and discharged water.

### General Requirements and Standards:

1. Drinking water must be chemically safe in terms of epidemiology and radiation;
2. The quality of drinking water that has not yet entered the distribution network must meet hygiene requirements;
3. The composition of drinking water must meet microbiological and parasitological standards.[2,3]

In the Republic of Azerbaijan, the quality indicators of drinking water supplied to consumers are defined according to the Interstate Standard (GOST 2874-82) jointly adopted by CIS countries. According to the GOST standard No. 2874-82, drinking water is analyzed based on over 35 parameters, including organoleptic, physico-chemical, microbiological, parasitological, and radiological indicators.

At the Jeyranbatan Water Reservoir, water is analyzed based on samples taken from seven points (in 2015, when we first began our research, samples were taken from 15 points. Later, some points were decommissioned, so our recent studies now focus on seven points). These points include the Jeyranbatan Water Reservoir (hereafter JWR) Taxtakorpü-Jeyranbatan canal, near the JWR water intake facility, near the JWR southern pump station, JWR southwestern dam seepage water, JWR southern dam seepage water, JWR northeastern dam seepage water, and the entrance to the JWR melioration pump station.

According to standards accepted by the World Health Organization, drinking water is defined by more than 50 parameters, and by European Union standards, more than 75 parameters are specified (information provided by the Ministry of Emergency Situations). For assessing the water in JWR, norm-bases are established for the measured parameters, which are then compared with current measurements. A functional model of the system is built.[4,5]

$$\begin{aligned} & \{ \{ I_{qA} \}; \{ I_{qT} \}; \{ I_{qE} \}; \{ I_{qB} \}; \{ I_{qC} \}; k \{ I_{qD} \}; \\ & : k_j \{ I_{qj} \}; O \{ P_{qj} \} \xrightarrow{\{ S_{D_{qj}} \} \Rightarrow O \{ P_{qj} \}} \{ \{ I_{qj} \}; k^* \{ I_{qj} \} \}. \end{aligned}$$

In the case of the Jeyranbatan Reservoir, various formulas and indicators are used to ensure water quality monitoring. These include:

- $\{ I_{qA} \}$ : The table of maximum allowable concentrations of factors in the water of the Jeyranbatan Reservoir.
- $\{ I_{qT} \}$ : The table of norms for water factors according to GOST (State Standards of CIS countries).

- $\{I_{qr}\}$ : The table of norms for water factors according to the European Union standards.
- $\{I_{qn}\}$ : The table of norms for water factors according to the World Health Organization (WHO).
- $\{I_{qi}\}$ :- The current values of water quality factors at measurement point  $i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ).
- $k\{I_{qi}\}$ : The coefficient comparing current data  $\{I_{qi}\}$  with the Jeyranbatan Reservoir norms.
- $K_j\{I_{qj}\}$ : The coefficient comparing current data with WHO, EU, and CIS standards ( $j=1, 2, 3$ ).
- $\{P_q\}$ : The set of activated parameters.
- $O\{P_q\}$ : The set of variations in the activated parameter values.
- $\{S\}$ : The impact operator.
- $\{SO_q\}$ : The scale of the impact factors.
- $(*)$ : The result of the impact of the operator  $SO_q$ .

A conceptual model of the system has been developed.[6]

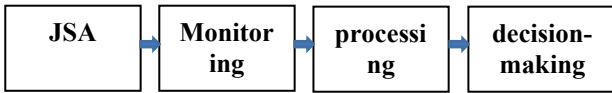


Figure 1. Conceptual model of the system

The module for the Jeyranbatan Reservoir consolidates information ranging from the reservoir's geographical position to physical, chemical, organoleptic, and microbiological parameters of the water. The monitoring module oversees control of informative parameters, measurement methods, and time series creation. The processing module facilitates time series analysis based on various methods, enabling forecasting. The decision-making module formulates instructions based on the current water status and ensures that water quality in the reservoir meets international standards.

Based on functional and conceptual models (Figure 1.), the system's architecture was developed (Figure 2). The monitoring results of the Jeyranbatan Reservoir are divided into three periods: model validation, system testing on new points, and system approval starting in 2022.

For each period, time series data were created for four respective databases. Simultaneously, the current water quality status is compared with baseline standards in real time.

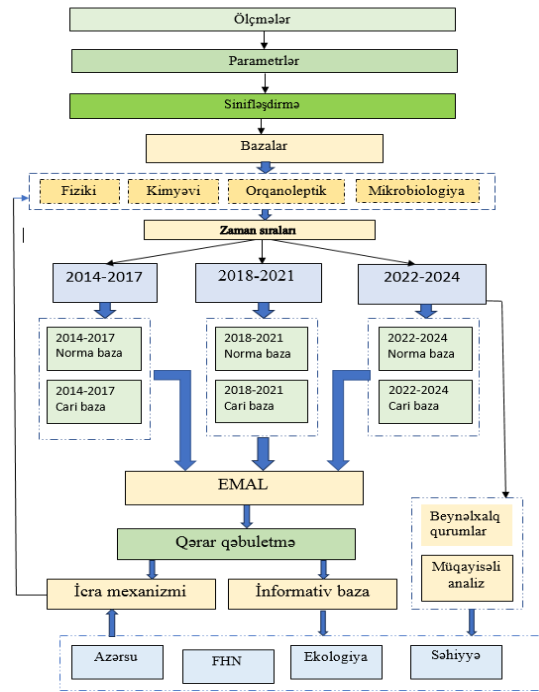


Figure 2. System architecture

The increasing demand for drinking water in Azerbaijan is one of the most critical issues. Existing reservoirs in the liberated territories are being restored, and new ones are being constructed. Considering that the sources of the rivers flowing in our republic are located abroad, security, especially the control of drinking water, must always be maintained. For this reason, the creation of a unified approach and an integrated intellectual control system that ensures the ecological safety of the general reservoirs is essential. From this perspective, it is appropriate to view the developed JWR intellectual information-measurement system as a prototype for the future unified system. [7]

HTML has been used to write the front-end code for the system's software, CSS technology for visual design, and the JavaScript programming language for adding functions. Below are fragments from the program.[8]

		Fiziki	Kimyavi	Orqanoleptik	Mikrobiol.	
Sıra nömrəsi	Su nümunələrinin götürüldüyü yerlər	Analiz olunan göstəricilər və ölçü vahidləri				
		pH	Temperatur C°	Aşıl mədət/mq/l	Bulanıqlıq NTU	
		Norma				
		6.5-8.5	-	0.75	2.5	-
1	CSA-Su götəricü qurğusunun yanı	8.2	21.9	2	2	639
2	CSA-Cənub Nasos Stansiyasının yanı	8.4	22	0.69	2	670
3	CSA-Cənub qərb dambası, sızma suları	8.4	21.9	9	2.7	1300
4	CSA-Cənub dambası, sızma suları	8.1	22	0.75	2.6	650
5	CSA-Şimal -qarq dambası sızma suları	8.5	22.1	0.75	2.6	645
6	CSA-Melorasıya nasos stansiyası	8.5	22.1	0.75	2.6	650

Figure 3. Processing for a single point



Figure 4. Fragment from the comparison performed in the program

It is known that currently water is discharged into the JSA via the Takhtakorpu-Jeyranbatan canal, which comes from the Takhtakorpu reservoir. For this reason, we have taken the Takhtakorpu canal as the main control point for comparisons. A large number of experiments have been conducted. First, the adequacy of the system is tested. Tests are conducted on the measurements from 2014-2017, and the accuracy of the results is checked. Testing pertains to the years 2018-2021, and the approval process to 2022-2024. A comparison and analysis are carried out between 16 overlapping measured parameters and the standards set by the World Health Organization, the European Union, GOST, the Absheron Peninsula, and the CSA.

**Result:** The regulation of measurements has been resolved. Thus, appropriate measurement times have been established for parameters that remain constant throughout the measurements, do not change during the seasonal period, and are irregularly affected by environmental factors; the system operates within the network. Interconnected organizations have the ability to engage in continuous exchanges when necessary. The working principle of the created system, the exchange of information, and decision-making functions are an example of paperless technology; the issue of forecasting based on data is solved using dispersion analysis, mathematical statistics, and probability theory methods. The increasing demand for drinking water in Azerbaijan is one of the most important issues. In the liberated territories, existing reservoirs are being restored, and new ones are being constructed. Considering that the origins of rivers flowing through our country are located abroad, safety, especially the control of drinking water, must be continuous. For this reason, it is essential to create a unified approach and a unified intellectual control system that ensures the ecological safety of all reservoirs. From this point of view, it is reasonable to consider the CSA intellectual information-measurement system as a prototype for a future unified system; it has been tested with measurements from 2018-2021 (25 parameters from 6-7 input/output points), and results of approximately 97.0% to 98.2% have been obtained. Processing for the years 2022 to May 2024 was carried out in parallel, and the system successfully passed the approval process. The application of the work has been confirmed by relevant acts [9].

REFERENCES

[1] Gallardo-Mayenco Alfonso, Macias Sonia, Toja Julia // Efectos de la descarga en la calidad del agua a lo largo de un rio mediterraneo: El rio Guadaira (Sevilla) //Limnetica, 2004. - no. 1-2. - s. 65—78.

[2] Curcic Svetlana, Comic Ljiljana/ a microbiological index in estimation of surface water quality 2002 // Hydrobiologia, 2002. No 1. - p. 219-224.

[3] Хван М.С. Статистическое исследование экологической безопасности территорий. Диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Новосибирск-2018. С.215.

[4] Srihari Athiyarathih, Mousumi Paul, Srivatsa Krishnaswamy, SN Computer sciences , A comparative study and analysis and time series forecasting techniques, 2020.

[5] Time Series HILARY TERM 2010, prof. Gesine Reinment, page 2.

[6] Гидаятзада С.Г. Гейдарова Н.Г. Велиева Э.С // Анализ микробиологического состава воды джейранбатанского Водохранилища азербайджанской республики\ American scientific journal № (34) / Vol.2, Ukraine, Kiev 2020, стр 9-13.

[7] T. Connolly, K. Begg and A. Strachan, "Data Bases. Design, Realization and Maintenance. Theory and Practice," Williams, Moscow, 2000, p. 1120.

[8] Andrius Buteikis, Time series with trend and seasonality components, 2019Ullo, Silvia Liberata; Sinha, G. R. (2020-05-31). "Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors". Sensors (Basel, Switzerland). 20 (11): 3113.

[9] G.G.Abdullayeva, Gidayatza S.G.,\ Approach To The Automatization Of Environmental Safety Monitoring Of Drinking Water In The Jeyranbatan Reservoir\ Transylvanian Review, Vol. 31 No. 2 (2023)

[10] <http://www.transylvanianreviewjournal.com/index.php/TR/article/view/1012>



# *The Possibility of Local Soils Use for Levees Construction as Part of Flood Protection*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.002>

Volodymyr Korniiichuk

National University of Water and Environmental  
Engineering,  
Rivne, Ukraine  
[v.i.korniichuk@nuwm.edu.ua](mailto:v.i.korniichuk@nuwm.edu.ua)

Andrii Shumlyanskyj

National University of Water and Environmental  
Engineering,  
Rivne, Ukraine  
[a.o.shumlyanskyj@nuwm.edu.ua](mailto:a.o.shumlyanskyj@nuwm.edu.ua)

**Abstract** – The levee is an important part of the complex of flood protection measures, which is direct a barrier against high water levels. At the same time, it is the most voluminous and time-consuming structure, the construction of which requires a significant amount of material and transport costs. For their construction, soil from local quarries can be used, which will significantly reduce the costs of their construction and speed it up. But before the possibility of their use, it is necessary to check their suffusion characteristics to ensure their seepage stability.

**Keywords** – levee; seepage flow; suffosion; erosion; eroding soil.

## I. INTRODUCTION

Floods are among the most frequent and destructive natural disasters globally, causing significant economic, environmental, and social impacts. Floods have become more intense and frequent in recent years due to a combination of natural and human factors, including climate change, urbanization, and inadequate flood management systems.

The floods in 2023 were particularly severe, affecting several countries across the continent. Slovenia, Greece, Turkey, Bulgaria, and Spain experienced some of the most devastating floods, with torrential rainfall overwhelming river systems and infrastructure. In Slovenia, August floods led to widespread damage, with thousands displaced and significant losses in agriculture and infrastructure [3]. Similarly, Greece, Turkey, and Bulgaria were hit by catastrophic flooding in September, with record rainfall causing fatalities and disrupting daily life [7].

Floods are not only driven by extreme weather events but are also exacerbated by human activities like deforestation, construction in flood-prone areas, and insufficient flood protection measures. As European nations continue to grapple with these disasters, the role of flood protection infrastructure, such as dams and levees, has come into focus. While these structures can reduce the risk of floods by controlling water levels, their failure either due to aging or extreme conditions can lead to catastrophic consequences [6].

The recent floods underscore the urgent need for a comprehensive approach to flood management that includes both structural measures like dams and levees, and non-structural measures such as improved early warning systems and sustainable land use planning. As climate change continues to intensify rainfall patterns

across Europe, the pressure on existing flood defenses will only increase, making it crucial to enhance resilience to future floods.

This sets the stage for a deeper exploration into how dams and levees function as key elements of flood protection, and how their design, maintenance, and management need to adapt to changing environmental conditions.

Climate change is already impacting peoples' daily lives and will continue to do so for the foreseeable future. For example, Europe is expected to get warmer, some regions getting drier, while others wetter [1]. These changes will not only impact our health but also the ecosystems we depend on. The EU is preparing to live with a changing climate through various adaptation measures.

Catastrophic consequences of inundation with floodwaters are becoming more and more common in Ukraine. The mountain and foothill regions of the Ukrainian Carpathians (Zakarpattia, Ivano-Frankivsk, Lviv, Chernivtsi regions), Polissia (Volyn, Rivne regions), the Danube and Dnieper territories suffer the greatest damage. Floods cause significant damage to industry, agriculture, and the population of this regions. Their reason lies in the peculiarities of the natural conditions of the Carpathians and adjacent territories, as well as human economic activity in this region.

The territory of Zakarpattia Region, due to its geographical position and climatic conditions, belongs to the zone of developed torrential activity, where during the year the level of precipitation reaches 100 millimeters or more in short periods of time, which is the reason for the formation of significant floods, often catastrophic in their consequences. Rain and snow-rain floods are characterized by frequency, intensity of flow and simultaneous coverage of large areas.

Several rain floods are observed in the Carpathians throughout the year, from 5-8 to 20-23 in certain high-water years. In recent years, floods have become catastrophic and have led to the flooding of large agricultural areas and settlements. Therefore, the issue of protection of territories adjacent to rivers from flooding is acute. The results of the analysis of the causes of emergency situations with catastrophic consequences indicate the need for a comprehensive approach to solving this problem.

## II. STATEMENT OF PROBLEM

The levee (barrier dam) in the flood protection system is the most expensive and time-consuming element, and the most vulnerable to damage. Significant volumes of soil material are needed for its construction. This soil can be extracted from local quarries in the valleys of the Carpathian rivers. The construction of an embankment dam depends on its height, the soil of the foundation and body of the dam, engineering and geological conditions.

The main feature (and the difference from embankment dams) of levees is that they hold the estimated water level for a short period of time - the time of the high flood level. In some cases, floods with elongated hydrographs may form, although not of maximum flow. In such cases, despite pressures that are lower than calculated, it is advisable to perform seepage calculations.

The second feature of levees, which significantly affects its operation, is that seepage flow during flood is non-stationary. In case of a short-term flood and a sufficiently low filtration coefficient of the embankment, water percolation to the downstream slope may not occur. In this case, with appropriate soil characteristics and pressure gradients can lead to particle movement and internal suffusion can occur, which may lead to changes in levee profile.

Depending on the structure of the levee and its elements, on the gradation of the soils of the body and foundation, their suffusion characteristics, under the influence of the seepage flow in the structure, seepage and suffusion deformations may occur both in the body and foundation of the levee or in other structural elements.

Flood protective levees can have a significant length and, accordingly, require a significant volume of material for their construction. Soil material from local quarries can be used for their construction, which will significantly reduce the cost of the dam itself, as well as transportation and production costs. In order to check the possibility of using these soils in the body of levees, they should be checked for suffusion resistance and seepage stability.

But regardless of their size, every embankment dam creates a hazard potential from the stored energy of the water they impound. Examples, such as Kelley Barnes Dam, which failed suddenly in 1977, show the destructive power of water when it is released suddenly from behind even a small embankment dam. This embankment dam was less than about 12m high and about 120m long, but when it failed, it released water downstream at an estimated flow rate of over 340 m<sup>3</sup>/s, killing 39 people [4].

In order to prevent such disasters, it is necessary to carefully select the material for the construction of dams. Therefore, a gradation analysis of soil samples taken from quarries possible for use in the construction of dams from the regions of Zakarpattia region near the Tisza River, where levees are especially relevant, was carried out. Based on this analysis, the suffusion resistance of these soils was verified.

## III. DISCUSSION OF RESULTS

According to [4] nonsuffusion soil is soil in which mechanical suffusion is impossible, even under the influence of significant pressure gradients, removal of fine particles from the soil will not occur. In suffusion soils, mechanical movement of soil particles can occur and develop when critical seepage rates are reached. The suffusion of soil samples was determined according to the methodology for embankment dam filters design [4]. Practice shows that when removing small particles from the soil, no more than 3...5% of the mass, the strength and stability of the soil is practically not disturbed. Accordingly, the soil from which the smallest particles of no more than 3...5% of the weight can be removed can be considered practically nonsuffusing soil. The soil should be considered (according to the geometric criterion) practically nonsuffusable if its parameters satisfy the following condition

$$\frac{d_5}{d_{17}} \geq N \quad (1)$$

$$N = 0,32\sqrt[6]{C_u(1 + 0,05C_u)} \frac{n}{1-n} \quad (2)$$

where  $d_5, d_{17}$  – diameter of soil particles, the smaller of which is contained in its composition 5 and 17% by mass, respectively, cm;  $C_u$  – coefficient of soil heterogeneity;  $n$  – soil porosity, in fractions of a unit. If condition (1) is not fulfilled, then the soil should be considered suffusable.

Internal suffusion in sand and gravel soils will develop when it contains particles with a diameter smaller than the diameter of the largest seepage pores in the soil  $d_0^{max}$ , at seepage speeds greater than the critical one  $V > V_{cr}$ . Soil particles that are smaller than the diameter of the largest seepage pores in the soil are called eroding particles, as they can be washed out by the seepage flow from the soil.

$$d_{ci} < d_0^{max} \quad (3)$$

$d_{ci}$  – diameter of eroding particles.

Estimated diameter of seepage pores in loose soils  $d_0$  can be determined with the formula

$$d_0 = C \frac{n}{n-1} d_{17} \quad (4)$$

where  $C = 0,455\sqrt[6]{C_u}$ .

The diameter of the maximum seepage stroke is determined according to the following dependence (taking into account soil segregation)

$$d_0^{max} = \chi d_0 = \chi C \frac{n}{n-1} d_{17} \quad (5)$$

$\chi$  – the coefficient of uneven placement of particles in the soil or the coefficient of locality of suffusion.

Maximum particle size  $d_{ci}^{max}$ , which can move in the soil and can be washed out from it

$$d_{ci}^{max} < 0,77 d_0^{max} \quad (6)$$

Results of the suffusion analysis are shown in table 1.

TABLE I. SOIL SUFFOSION ANALYSIS

Sample	$d_{max}$	$C_u$	$n$	$d_5$	$d_{10}$	$d_{17}$	$d_{50}$	$d_0$	$d_0^{MASC}$	$d_{ci}$	Suffosion
	mm			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
Plot No. 1 - village Dubove, Tyachiv district, river Tisa											
S1-1	95,0	81,88	0,21	0,231	0,379	0,833	20,69	0,21	0,82	0,63	+
S1-2	104,0	50,10	0,23	0,267	0,429	0,856	12,90	0,22	0,72	0,56	+
S1-3	132,0	77,77	0,21	0,303	0,707	1,588	37,66	0,40	1,55	1,19	+
S1-4	80,0	61,11	0,22	0,255	0,399	0,636	10,56	0,16	0,57	0,44	+
S1-5	58,0	9,95	0,30	0,125	0,158	0,238	0,91	0,07	0,10	-	-
Plot No. 2 - village Tyachiv, Tyachiv district, river Tisa											
S2-1	102,0	204,29	0,17	0,181	0,299	0,883	45,95	0,20	1,15	0,89	+
S2-2	79,0	173,09	0,18	0,148	0,241	0,425	30,45	0,10	0,53	0,41	+
S2-3	121,0	101,50	0,20	0,281	0,602	16,028	52,59	3,92	16,96	13,06	+
S2-4	94,0	52,49	0,23	0,267	0,522	0,958	15,40	0,25	0,82	0,63	+
Plot No. 3 - village Ternove, Tyachiv district, river Tisa											
S3-4	80,0	425,02	0,14	0,077	0,093	0,451	28,775	0,09	0,71	0,55	+
S3-5	129,0	19,00	0,27	0,917	4,395	17,32	72,169	4,81	9,39	7,23	+
S3-6	120,0	32,95	0,25	0,344	1,401	4,741	32,516	1,28	3,51	2,70	+
S3-4a	132,0	26,03	0,26	1,056	3,148	11,092	69,402	3,03	7,63	5,87	+
S3-5a	82,0	40,85	0,24	0,285	1,272	4,669	38,034	1,24	3,70	2,85	+

According to the gradation analysis of the soil samples of the soils belong to gravel soils with large rock fragments, with a high degree of heterogeneity (Tab. 1)  $C_U = 30...120$ . Practically all soil samples turned out to be potentially suffusive. In order to use them as material for levees, it is necessary to carry out seepage calculations, to arrange special filters and drains as a means of controlling and directing the flow of seepage water through dams. Filters are used to prevent movement of soil particles from or between various zones and foundations of embankment dams.

Levees can be constructed with the use of the soils from quarries located directly near rivers. Their cross-sectional parameters must be sufficient to withstand the flow gradient without internal erosion of few grains of soil or they must be equipped with filters used as a defensive measure to protect these structures from the less than desirable conditions that may exist or develop over the life of the structure.

#### REFERENCES

- [1] Asadieh, B., Krakauer, N.Y., 2017. Global change in streamflow extremes under climate change over the 21st century. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 5863–5874.
- [2] Chapuis, R.P. 1992. Similarity of internal stability criteria for granular soils. In *Canadian Geotechnical Journal* 29, pp. 711–713.
- [3] European Academies Science Advisory Council, 1980. 2018. New data confirm increased frequency of extreme weather events, European National Science Academies urge further action on climate change adaptation.
- [4] Filters for Embankment Dams, Federal Emergency Management Agency, 2011.
- [5] General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams (EM 1110-2-2300), USACE, 2004
- [6] <https://floodlist.com/europe>
- [7] K. Furtak and A. Wolińska, “The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture,” *CATENA*, vol. 231, pp.1-15, 2023
- [8] National Engineering Handbook: Chapter 26 - Gradation Design of Sand and Gravel Filters, NRCS, 2017
- [9] Talbot, J.R., and D.C. Ralston. 1985. Earth dam seepage control, SCS experience. In R.L. Volpe and W.E. Kelly (ed.), *Seepage and leakage from dams and impoundments*. Geotechnical Engineering Division Symposium Proceedings, Denver, CO. Amer. Soc. Civil Eng., New York, NY, pp. 44–65.
- [10] USDA. National Engineering Handbook, Part 642, Chapter 26, Construction Specification 24, Drainfill. || 2001.

# *Modeling and evaluation of the effectiveness of the operation of Danube rice irrigation systems taking into account environmental requirements*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.003>

Vasyl Turchenyuk

National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
[v.o.turchenyuk@nuwm.edu.ua](mailto:v.o.turchenyuk@nuwm.edu.ua)

Svitlana Kozishkurt

National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
[s.m.kozishkurt@nuwm.edu.ua](mailto:s.m.kozishkurt@nuwm.edu.ua)

Natalia Prykhodko

National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
[n.v.prihodko@nuwm.edu.ua](mailto:n.v.prihodko@nuwm.edu.ua)

Nazarii Voitsekhovych

National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
[n.v.voitsekhovych@nuwm.edu.ua](mailto:n.v.voitsekhovych@nuwm.edu.ua)

**Abstract** – A mathematical modeling approach was employed to establish a suite of indicators for assessing the efficiency of Danube rice irrigation systems. The proposed indicators facilitate the identification of rational management strategies, including methods, regimes, and schemes for regulating the natural and reclamation processes of irrigated lands. This takes into account the unique characteristics of rice systems while ensuring compliance with current environmental regulations and principles of sustainable development.

**Keywords** – Danube rice irrigation systems, efficiency of functioning, regression analysis, natural and reclamation regimes, ecological requirements.

## I. INTRODUCTION

For the effective and ecologically safe use of rice irrigation systems (RIS), it is essential to revise approaches to land reclamation and develop scientifically based methods for managing the fertility of irrigated lands. This includes improving their agro-ecological conditions and promoting rational usage. These methods must adapt to natural and anthropogenic changes, ensuring maximum profit while preserving land resources.

Rice systems possess specific characteristics due to the requirement of maintaining a layer of water in the fields, complicating system operations. The effectiveness of RIS is evaluated based on crop productivity, water consumption, and the condition of the irrigated lands.

To evaluate the effectiveness of RIS, it is necessary to assess the impact of a set of indicators. These indicators can be expressed as requirements for factors influencing soil formation and plant development while considering the water-air, salt, and other regimes of rice systems.

## II. STATEMENT OF THE PROBLEM

Rice systems exhibit several features that distinguish them from conventional reclamation objects in the irrigation zone. These distinctions arise from the complex geological and hydrogeological conditions of the territories designated for their establishment, as well as the predominance of flooded rice as the primary crop in the rotation. The specificity of this crop lies in its cultivation technology, particularly the necessity to maintain a layer of water in the fields throughout the growing season [1, 2].

Consequently, the rice irrigation system (RIS) constitutes a complex network of water supply, drainage, regulation, and other elements, all interconnected within a singular technological process alongside rice fields that support both flooded rice and accompanying dry crops in the rotation.

The assessment of RIS effectiveness should consider crop productivity, water resources, and both natural and reclamation regimes. To this end, it is crucial to establish a set of indicators that will facilitate the evaluation of RIS operation effectiveness while accounting for ecological and economic requirements, as well as yield models.

## III. SOLUTION OF THE PUBLISHED PROBLEM

The rationale behind this set of indicators is to facilitate the improvement and optimization of rice irrigation system management. This will be achieved by employing a comprehensive suite of predictive optimization models, including crop yield models for rice rotations, to enhance the overall efficiency of RIS while ensuring compliance with current environmental and economic regulations.

## Modeling, control and information technologies – 2024

Evaluating the efficiency of rice fields necessitates indicators that characterize the water cycle, taking into account the design of the rice irrigation system. These indicators should be obtainable through experiments or predictive models of water management, reclamation, and crop yield.

To assess the ecological efficiency of rice irrigation systems within optimization models, it is essential to investigate the relationships and suitability of these indicators as evaluation criteria.

The concept of "yield as a function of multiple variables" requires the development of a methodology for constructing statistical yield prediction models. This methodology should consider various factors influencing yield and utilize multi-criteria regression analysis for indicator selection.

A correlation matrix serves as the foundation for the multi-criteria regression analysis method, enabling the identification of interrelationships among factors impacting crop yield:

$$|r_{mn}| = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

where  $r_{mn}$  is the pairwise correlation coefficient between factors influencing crop yield. This method allows for the gradual elimination of factors with the least impact on yield, thereby increasing the accuracy of the forecasting model. The analysis was conducted using long-term rice production data from the Danube River delta at the Kiliya Rice Irrigation System, covering the period from 1966 to 2018 [5].

Based on the analysis and generalization of data from long-term research and relevant literature, we have

identified a set of indicators that highlight various aspects of rice yield formation [1, 2, 3, 4, 5, 6].

This set of criteria, substantiated through multi-criteria regression analysis, includes the following key indicators:

*Y* – Rice yield: the primary economic indicator of production efficiency.

*Hg* – Groundwater level depth: a combined indicator reflecting the impact of hydrological conditions.

*P* – Heat and moisture supply: an indicator of climatic conditions during the growing season.

*M* – Rice irrigation rate: a reclamation technological resource determining the amount of water required to maintain yield.

*A* – Indicator of the agro-ecological and reclamation state of soils: an environmental criterion reflecting the conditions affecting yield formation.

*V* – Filtration rate: a technological indicator characterizing the environmental impact on the yield formation process through the water regime.

These indicators enable a comprehensive assessment of the efficiency of rice irrigation systems and facilitate yield forecasting based on mathematical models.

The results of the multi-criteria regression analysis of long-term rice cultivation data at the Kiliya Rice Irrigation System confirm the significant impact of various factors on rice yield.

The matrix of pairwise correlation coefficients illustrates the relationships between yield and factors such as irrigation rate, heat and moisture supply, agro-ecological and ameliorative state of soils, groundwater depth, and filtration rate (Table 1).

TABLE I. CORRELATION MATRIX FOR RICE IRRIGATION SYSTEM PERFORMANCE

Indicator	Rice yield, <i>Y</i>	Rice irrigation rate, <i>M</i>	Heat and moisture supply, <i>P</i>	Indicator of the agro-ecological and ameliorative state of soils, <i>A</i>	Groundwater level depth, <i>Hg</i>	Filtration rate, <i>V</i>
<i>Y</i>	1	0.1939	0.4612	0.9065	0.4613	0.8197
<i>M</i>	0.1939	1	0.2509	-0.1432	0.1662	0.1999
<i>P</i>	0.4612	0.2509	1	0.367	0.198	0.2634
<i>A</i>	0.9065	-0.1432	0.367	1	0.4164	0.7442
<i>Hg</i>	0.4613	0.1662	0.198	0.4164	1	0.4178
<i>V</i>	0.8197	0.1999	0.2634	0.7442	0.4178	1
<b>Standard errors of correlation coefficients</b>						
<i>Y</i>		0.15	0.12	0.02	0.12	0.05
<i>M</i>	0.15		0.14	0.14	0.15	0.14
<i>P</i>	0.12	0.14		0.13	0.14	0.14
<i>A</i>	0.02	0.14	0.13		0.12	0.07
<i>Hg</i>	0.12	0.15	0.14	0.13		0.12
<i>V</i>	0.05	0.14	0.14	0.07	0.12	
$r^2=0.887, r=0.942$						

The strongest correlation with rice yield is observed for the agro-ecological-reclamation condition of soils (correlation coefficient – 0.90) and filtration rate (correlation coefficient – 0.82). This shows that ecological conditions and anthropogenic factors,

particularly the soil's water conductivity, are of key importance for productivity.

A weaker but still significant relationship was found with heat and moisture availability during the growing season (correlation coefficient – 0.46) and the groundwater depth during the inter-irrigation period



## Modeling, control and information technologies – 2024

(correlation coefficient – 0.46). These factors reflect climatic and hydrological conditions, which also influence crop development.

The irrigation rate has a relatively weak correlation with yield (correlation coefficient – 0.19), due to the fact that a significant portion of the water is used to create a water layer and compensate for filtration losses, rather than directly meeting the crop's water demand.

According to the results of the regression analysis, the distribution of the importance of factors influencing rice yield formation is as follows:

- Indicator agro-ecological and ameliorative condition of the soil – 41%;
- Filtration rate from the surface of the check – 25%;
- Heat and moisture supply – 13%;
- Groundwater level depth during the inter-irrigation period – 12%;
- Rice irrigation rate – 9%.

### CONCLUSION

The main determining factors influencing rice yield are the ecological condition of the soil and the filtration rate, which underscores the importance of effective management of the natural and reclamation regime of irrigated fields. The results obtained provide a foundation for further implementation of optimization models in irrigation system management, particularly for the development of environmentally safe and economically sound engineering solutions for the design and operation of irrigation systems.

This will enhance the efficiency of irrigation systems, ensuring compliance with modern ecological and economic standards and promoting the rational use of water resources.

### REFERENCES

- [1] Pidvyshennya efektyvnosti funktsionuvannya Prydunayskykh rysovykh zroshuvalnykh system: naukovy-metodychni rekomendatsiyi / Stashuk V.A., Rokochynskyy A.M., Turchenyuk V.O. ta in. Odesa-Rivne: NUVGP, 2018, 107 s.
- [2] Pidvyshchennya efektyvnosti funktsionuvannya rysovykh zroshuvalnykh system Ukrainy: naukovy-metodychni rekomendatsiyi / za zag. red. V. A. Stashuka, R. A. Vozhegovoii [ta in.]. vyd. 2-ge, pererob. ta dopovn. Kyiv; Kherson; Rivne: NUVGP, 2020, 203 s.
- [3] Stashuk V.A. Suchasnyy stan ta shlyakhy pidvyshchennya zagalnoyi ekologo-ekonomichnoyi efektyvnosti rysovykh zroshuvalnykh system Ukrainy / V.A. Stashuk, A.M. Rokochynskyy, L.M. Granovska // Melioratsiya i vodne hospodarystvo. K.: Agrama nauka. 2012, Vyp. 1 (97), S. 19–22.
- [4] Stashuk V.A., Rokochynskyy A.M., Turchenyuk V.O. Shlyakhy pidvyshchennya efektyvnosti rysovykh zroshuvalnykh system pivdnyia Ukrainy // Visnyk NUVGP. Tekhnichni nauky, 2021, 3(95), 148-160.
- [5] Rys Prydunavya: [kolektyvna monografiya] / za red. V.A. Stashuka, A.M. Rokochynskoho, P.I. Mendusya, V.O. Turchenyuka. Kherson: Hrin' D.S., 2016, 620 s.
- [6] Turchenyuk V.O., Rokochynskyy A.M. Teoretychni ta praktychni aspekty systemnoyi optymizatsiyi funktsionuvannya rysovykh zroshuvalnykh system na ekologo-ekonomichnykh zasadakh // Visnyk NUVGP. Tekhnichni nauky, 2018, 1(81), 3-11.

# Аналіз існуючих досліджень коефіцієнта гідравлічного опору в трубах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.004>

Любов Волк

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[l.r.volk@nuwm.edu.ua](mailto:l.r.volk@nuwm.edu.ua)

Іванна Довбенко

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[i.e.dovbenko@nuwm.edu.ua](mailto:i.e.dovbenko@nuwm.edu.ua)

Олександр Безусяк

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[o.v.bezussyak@nuwm.edu.ua](mailto:o.v.bezussyak@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – Представлено теоретичні дослідження коефіцієнта гідравлічного опору в трубах з однорідною зернистою шорсткістю. Результати дадуть змогу удосконалити залежності для практичних розрахунків трубопроводів.

**Ключові слова** – область доквадратичного опору, коефіцієнт гідравлічного опору

## I. ВСТУП

При розв'язанні гідродинамічних задач виникають питання гідравлічного розрахунку трубопроводів. Рух рідин у трубопроводах відбувається за рахунок різниці геодезичних відміток або за рахунок енергії, яка передається їм при проходженні через насоси. Гідравлічний розрахунок трубопроводу, зазвичай, проводиться для визначення втрат напору та економічного діаметра труб при заданій витраті рідини.

Коефіцієнт гідравлічного опору в координатах  $lg(100\lambda) = f(lg Re)$  в залежності від діючих факторів та гідравлічного режиму в межах виділених областей приймає різні значення. Для виявлення закономірностей впливу основних діючих факторів, в межах виділених областей, на значення коефіцієнта гідравлічного опору, вітчизняними та зарубіжними вченими виконано великий обсяг експериментальних та теоретичних досліджень.

## II. МЕТОДИ ТА МАТЕРІАЛИ

Предметом наших теоретичних досліджень є отримання загальної математичної моделі для визначення коефіцієнта гідравлічного опору при турбулентному режимі.

Для розробки загального методу кількісного врахування втрат напору в потоці реальної рідини необхідно виявити залежність сил тертя на внутрішній поверхні стінки труби від основних діючих факторів. Такими основними факторами є

густина рідини  $\rho$ , динамічна в'язкість  $\mu$ , гідравлічний радіус потоку  $R$ , осереднена висота виступів шорсткості  $k$  та середня швидкість потоку  $\bar{u}$  [6].

## III. РЕЗУЛЬТАТИ

В області гідравлічно гладкого опору коефіцієнт гідравлічного опору залежить лише від числа Рейнольдса (рис. 1).

Згідно з нормативною та довідковою літературою [1-6] для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору для області гідравлічного гладкого опору рекомендовано застосовувати Г. Блазіуса.

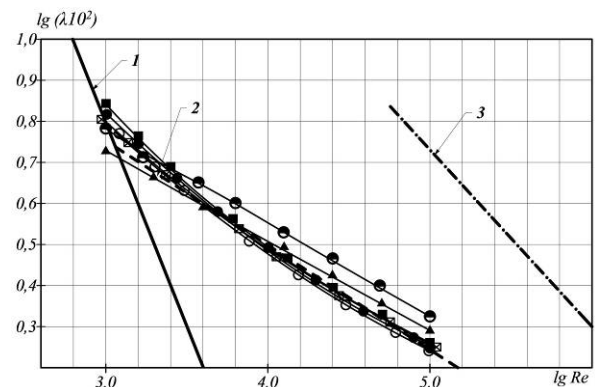


Рисунок 1. Графік залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса: 1 – ламінарний режим руху потоку; 2 – область гідравлічно гладкого опору (Г. Блазіус); 3 – межа між областями доквадратичного та квадратичного опору; за залежностями:  $\square$  - Л. Прандтля,  $\circ$  - К. Колбрука;  $\bullet$  - П.К. Конакова;  $\blacksquare$  - Г.К. Філоненка;  $\blacktriangle$  - М.Я. Рузіна;  $\bullet$  - Ф.А. Шевельова

На рисунку 2 приведені дослідні точки за даними Й. Нікурадзе в області доквадратичного опору. Ліворуч вони обмежені графіком, який відповідає області гідравлічно-гладкого опору. Праворуч, в

області квадратичного опору, продовжені графіком (горизонтальні лінії) за рівнянням Л.Прандтля.

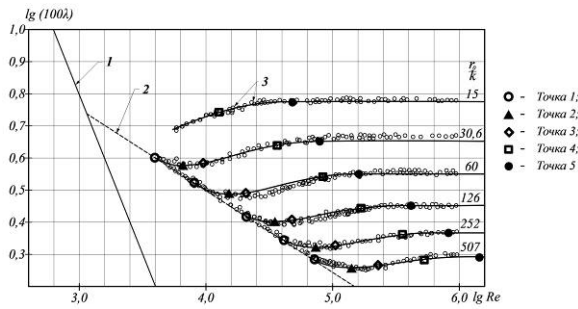


Рисунок 2. Графіки залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса та гладкості внутрішньої поверхні труб: 1 – ламінарний режим руху потоку; 2 – область гідравлічно-гладкого опору (Г. Блазіус); 3 – дослідні точки (за даними Й. Нікурадзе)

При турбулентному режимі в області доквадратичного руху потоку коефіцієнт гідравлічного опору залежить не тільки від числа Рейнольдса, а і від відносної еквівалентної гладкості внутрішньої поверхні трубопроводу  $\lambda = f(Re, r_0/\varepsilon)$ .

К. Колбрук у 1937 р. здійснив експерименти на шістнадцяти круглих бетонних трубах та шести трубах діаметром покритих бітумом діаметром від 101,6 мм до 1524 мм із середніми значеннями еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні між 0,04318 мм та 0,254 мм.

Намагаючись класифікувати наявні на той час дані та дані його експерименту, проведеного ним самим та його колегою К. Уайтом у 1937 році, К. Коулбрук (1939 р.) розробив криву, яка аналогічно описувала залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса, як і графік І. Нікурадзе

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,7d} \right). \quad (1)$$

Рівняння К. Колбрука також можна записати у такому вигляді і воно рекомендоване ним для області квадратичного опору

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \lg \left( \frac{\varepsilon}{d} + \frac{9,35}{Re \sqrt{\lambda}} \right). \quad (2)$$

Залежність (2) для визначення коефіцієнта гідравлічного опору включає крім параметра еквівалентної шорсткості, ще й число Рейнольдса, яке характеризує режим потоку в трубопроводі.

Існує багато наближених рішень рівняння К. Колбрука.

У 1947 році Л. Муді запропонував рівняння на основі експериментальних даних, яке відрізнялось від рівняння К. Колбрука у значеннях до 21,49 %

$$\lambda = 0,0055 \left( 1 + \left( 2 \cdot 10^4 \frac{\varepsilon}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right). \quad (3)$$

Застосування рівняння (3) рекомендоване Л.Муді у діапазоні чисел Рейнольдса  $Re = 4000 \div 5 \cdot 10^6$ , й відносної еквівалентної шорсткості  $\frac{\varepsilon}{d} = 0 \div 0,01$ .

Ф.О. Шевельов дослідив у 1953 р. на гідравлічних та аеродинамічних установках при турбулентному режимі руху води вплив числа Рейнольдса на коефіцієнт гідравлічного опору в сталевих та чавунних трубопроводах.

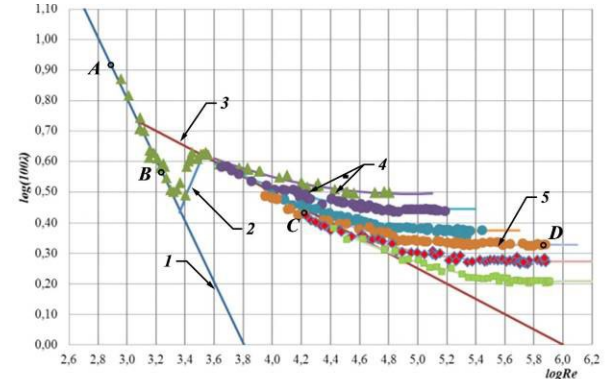


Рисунок 3. Графіки залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса для нових сталевих трубопроводів (за даними Ф.О. Шевельова): 1 – ламінарний режим руху потоку; 2 – перехідна область; 3 – область гідравлічно гладкого опору (Г. Блазіус); 4 – область доквадратичного опору; 5 – область квадратичного опору

У 1966 році Д. Вуд запропонував рівняння, яке є аналогічне рівнянню Муді

$$\lambda = 0,094 \left( \frac{\varepsilon}{d} \right)^{0,225} + 0,53 \left( \frac{\varepsilon}{d} \right) + 88 \left( \frac{\varepsilon}{d} \right)^{0,44} Re^{-\psi}, \quad (4)$$

де  $\psi$  - показник степені  $\psi = 1,62 \left( \frac{\varepsilon}{d} \right)^{0,134}$ .

Застосування рівняння (4) рекомендоване Д. Вудом у діапазоні  $Re = 4000 \div 5 \cdot 10^7$ ,  $\frac{\varepsilon}{d} = 0,00001 \div 0,04$ .

Д. Соннад і К. Гудар у 2006 році змінивши підхід до рівняння і застосувавши W-функція Ламберта, здійснили апроксимацію та отримали рівняння

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,8686 \ln \left( \frac{0,4587 Re}{G^{G/(G+1)}} \right), \quad (5)$$

де  $G = 0,124 Re \frac{\varepsilon}{d} + \ln(0,4587 Re)$ .

Рекомендований діапазон застосування рівняння (5) Д. Соннад і К. Гудар у межах  $4000 \leq Re \leq 10^8$ ,  $10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{d} \leq 5 \cdot 10^{-2}$ .

Також аналогічний підхід здійснили іранські вчені А.Р. Ватанхах (2008) і М. Кучакзаде (2009) та отримали аналогічну залежність.

Д. Бркіч у 2011 році запропонував рівняння шляхом апроксимації даних

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{2,18\beta}{Re} + \frac{\varepsilon}{3,71d} \right), \quad (6)$$

$$\text{де } \beta = \ln \frac{Re}{1,816 \ln \left( \frac{1,1 Re}{\ln(1+1,1 Re)} \right)}.$$

Д. Бркіч рекомендував застосування формули (6) для діапазону  $4000 \leq Re \leq 10^8$ ,  $0 \leq \frac{\varepsilon}{d} \leq 5 \cdot 10^{-2}$ .

В. Беллос, І. Налбантіс та Д. Тсакітіс у 2018 році опублікували роботу з рекомендацією використовувати для визначення коефіцієнта гідравлічного опору

$$\lambda = \left( \frac{64}{Re} \right)^a \left[ 0,75 \ln \frac{Re}{5,37} \right]^{2(a-1)b} \left[ 0,88 \ln 6,82 \frac{d}{\varepsilon} \right]^{2(a-1)(1-b)}, \quad (7)$$

$$\text{де } a = \frac{1}{1 + \left( \frac{Re}{2,712} \right)^{8,4}}; \quad b = \frac{1}{1 + \left( \frac{Re}{150 \frac{d}{\varepsilon}} \right)^{1,8}}.$$

Всі залежності для визначення коефіцієнта гідравлічного опору рекомендовані тільки для певних конкретних умов (матеріал, вид шорсткості поверхні, висота виступів, відстань між ними, їх форма та розташування по поверхні). Адекватну

залежність зміни коефіцієнта гідравлічного опору від всіх основних діючих факторів можна встановити лише дослідним шляхом.

Необхідно відмітити, що графік залежності зміни коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса розкриває тільки режими руху, але не розкриває структуру потоку, яку необхідно враховувати при гідравлічних розрахунках трубопроводів.

#### REFERENCES

- [1] Теоретичні дослідження коефіцієнта гідравлічного опору в гідравлічно гладких трубопроводах / М. М. Хлапук, О. В. Безусьяк, Л. Р. Волк та ін. // Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць. - Рівне : НУВГП, 2020. - Вип. 4(92). - С. 23-36.
- [2] Волк Л.Р., Безусьяк О.В. та ін. (2021). Удосконалення розрахунку закритої колекторно-дренажної мережі дренажних систем. Меліорація і водне господарство, (1), 98 - 106.
- [3] Nikuradse J. Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren / J. Nikuradse. – Forsch. Arb. Ing. Wes., 1932. – N. 356.
- [4] Nikuradse J. Strömungsgesetze in rauchen Rohren / J. Nikuradse // Forsch. Ver. Dtsch. Ing. – 1933. – N. 361.
- [5] Khlapuk M., Bezusyak O., Volk L., Zhang Z. Theoretical research of friction factor in hydraulically smooth pipes. Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters. Volume 280, 2021. P.1-6.
- [6] Volk, L., & Безусьяк, О. (2023). Коефіцієнт гідравлічного опору в трубах з однорідною зернистою шорсткістю. Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, (6), 210–211. <https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.064>.

# Класифікація рибопропускних споруд

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.005>

Інна Мельничук

Національний університет водного господарства та природокористування

м. Рівне, Україна

[i.m.melnychuk@nuwm.edu.ua](mailto:i.m.melnychuk@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – Тези доповіді присвячені класифікації рибопропускних споруд, опису принципів їхньої роботи, області застосування, перевагам та недолікам даних споруд.

**Ключові слова** – рибхід; донна рампа; рибопропуск; обхідні канали.

У світовій практиці розрізняють три основні типи рибопропускних споруд: близькі до природних, технічні та спеціальні [1].

## І. Близькі до природних рибопропускні споруди

### Донна рампа або схил

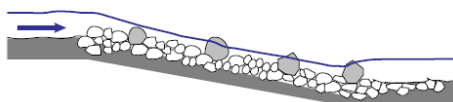


Рис. 1. Донна рампа або схил

Рампа або схил - споруди, що мають шорстку поверхню, яка простягається на всю ширину річки (рис. 1). Надається перевага конструкціям з хаотичним і розсіяним розміщенням каменю. ширини як і річка ( $b =$  ширині річки) її ухил зазвичай  $<1:15$ . Висота  $h > 0,2$  м. Витрата повинна бути  $q > 100$  л/с на м. Конструкція складається з кількох шарів каменю різного діаметру по дну. Рекомендовано використовувати там, де рівень ВБ коливається не значно. Використовують також для запобігання розмиву на греблі. Є небезпека пересихання при низькій витраті. Відносно низька вартість. Вони добре вписуються в ландшафт, виглядають природно, не потребують значного обслуговування. Немає проблем з приналежними потоками так, як риба може легко знайти вхід на рампу. Вони є прохідними в обох напрямках для всієї аквафауни.

### Обхідні канали

Обхідні канали пропонуються як альтернативний маршрут навколо дамби з природним обхідним потоком.  $b > 1,2$  м,  $h > 0,2$  м,  $i < 1:20$ . Мінімальна витрата повинна бути  $q = 100$  л/с м. Підходить для всіх перешкод і, головне, щоб був наявний достатній простір навколо водосховища, найчастіше використовують для модернізації

існуючих установок (рис.2). Не придатні тоді, коли значно змінюється рівень у ВБ, в цьому випадку може бути необхідним регулювання витрати води в обхідному каналі.

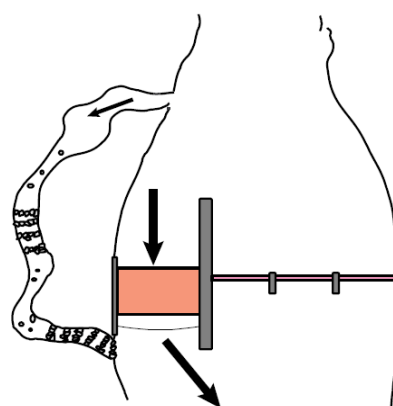


Рис. 2. Обхідні рибопропускні канали

Фінансові затрати на будівництво відносно низькі, але обхідні канали вимагають чималого простору. Може бути необхідність комбінації з іншими технічними спорудами. Обхідні канали є прохідними для всієї аквафауни, забезпечують життєвий простір для реофільних видів, є рибопропускними, що можуть обходити всю площу дамби і водосховища та добре вписуються в ландшафт.

### Рибні рампи

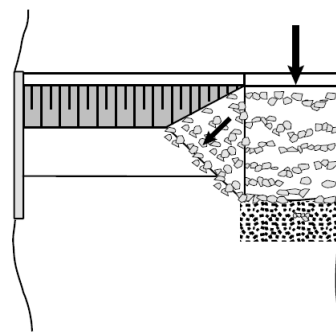


Рис. 3. Рибна рампа

Рампи з пологими схилами і шорсткою поверхнею, інтегровані в споруду дамби (рис.3).  $b > 2,0$  м,  $h > 0,3..0,4$  м,  $i < 1:20$  або менше. Необхідна витрата приблизно  $q=100$  л/с м. Рампи можуть бути використані для подолання висот не більше ніж 3м. І не підходять при змінному рівні у ВБ водосховища. Ця конструкція є часто технічно складною з огляду структурної стабільності. Є загроза висихання при низьких рівнях води. Потребують мінімального обслуговування. Створюють хороший принаджуючий потік. є прохідними для всієї аквафауни в обох напрямках, тобто проти течії та за течією.

## II. ТЕХНІЧНІ ТИПИ РИБОПРОПУСКНИХ СПОРУД

### Щитовий рибохід

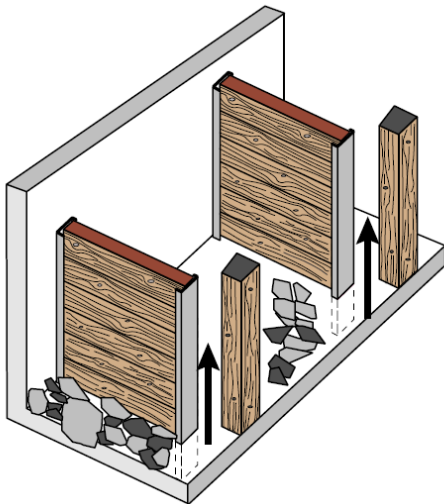


Рис.4. Щитовий рибохід

Щитовий рибохід - це загалом бетонний канал з поперечними стінками з бетону або з дерева з одним або двома пазами, що простягаються на всю висоту між поперечною та бічною стінками (рис.4). Розміри басейну  $l_b > 1,90$  м;  $b > 1,20$  м;  $h > 0,5$  м; Ширина пазу  $S > 0,17$  м. Витрата може бути від 140 л/с до кількох метрів кубічних за секунду. Використовують при малих та середніх рівнях води у ВБ, підходить для змінного РВ у ВБ. Може використовуватись і для малих потоків, і для великих річок. Мінімальна глибина в НБ повинна бути  $h > 0,5$ м. Можуть бути пропущені відносно високі витрати, таким чином може формуватися хороший принаджуючий потік. Надійніші, ніж звичайні басейнові рибопропуски, тому, що низький ризик засмічення пазів. На даний час є найкращим типом технічних РПС придатних для всіх видів риби.

### Басейновий рибохід

Це загалом бетонний канал з поперечними стінами з дерева або бетону, які встановлені з зануреними під воду отворами і верхніми вирізами на різних сторонах (рис. 5). Розміри басейну залежать від зони річки:

$L_b > 1,4$  м;  $b > 1$  м;  $h = 0,6$  м. Занурені отвори  $b_s/h_s > 25*25$ см. Витрата  $Q=80\pm 500$ л/с. Використовують при малих та середніх рівнях води у ВБ на меліоративних дамбах та при ГЕС. Дозволяються тільки відносно низькі витрати, є великий ризик засмічення. Дозволяються тільки відносно низькі витрати, є великий ризик засмічення.

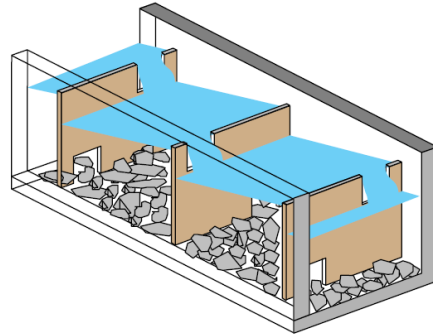


Рис. 5. Басейновий рибохід

Придатні для всіх видів риби, якщо розміри басейнів, отворів вибрані як функція від розміру риби, що може зустрічатися в певній місцевості.

Може бути не достатній принаджуючий потік при низьких витратах.

### Лотоковий рибохід Деніла

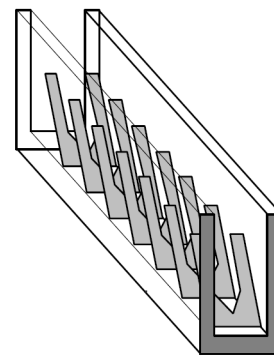


Рис. 6. Лотоковий рибохід Деніла

Дерев'яний або бетонний канал з секційними перегородками (звичай з дерева), які є U-подібної форми і встановлені під кутом  $45^0$  проти напрямку потоку (рис. 6). Канал:  $b = 0,6..0,9$ м;  $h > 0,5$  м;  $i < 1:5$ ;  $Q > 250$  л/с. Довжина каналу може бути 6..8 м. Відпочивальні басейни є необхідними для перепаду висоти  $> 1,5..2$  м. Підходить для малих рівнів води у ВБ, особливо для модернізації старих гребель, коли там не багато простору. Відносно високі витрати не повинні використовуватись при змінних рівнях у ВБ, не чутливі до змін рівнів у НБ, потребують мало простору, дешеві, добре формують принаджуючий потік. Відповідно до сучасних знань менш придатні для слабких плавців або малих риб. Вибірковий. Не можуть пропустити донну фауну.



III. СПЕЦІАЛЬНІ ТИПИ РИБОПРОПУСКНИХ СПОРУД

*Вугрові східчасті рибоходи*

Вугрові східчасті рибоходи - це маленькі канали з арматурою пензликів типу з шарів хмизу або гравію, що пропускають воду, а також так звані «вугрові труби», що проходять через тіло греблі і є заповнені хмизом або подібним матеріалом (рис. 7). Канал:  $b = 30...50$  см;  $h = 15...25$ см; Ухил 1:5...1:10, але може бути і крутішим.

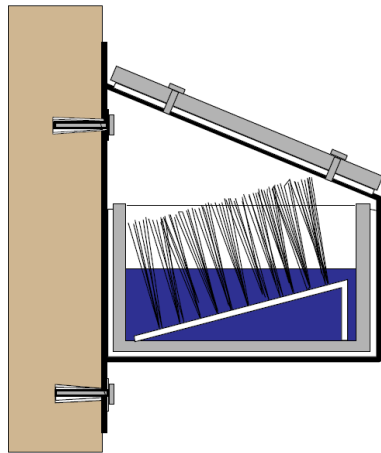


Рис. 7. Вугрові східчасті рибоходи

Часто використовують як обхідний в басейнових рибопропусках, але є придатним тільки там, де відбувається міграція скляних і молодих вугрів, загалом не обов'язкові, якщо є інші РПС. Низька вартість конструкції, потребують малий простір і потрібні тільки низькі витрати. Придатні тільки для молодих і скляних вугрів. Вугрові труби не досконалі, тому що в процесі використання можуть засмічуватися. Не можуть гарантувати вільний пропуск для інших видів риб.

*Рибохідний шлюз*

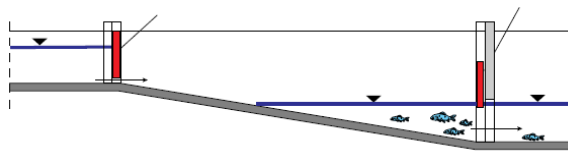


Рис. 8. Рибохідний шлюз

Рибохідний шлюз являє собою шахтоподібну камеру з контрольованим закриттям у ВБ і відкриттям у НБ (рис. 8). Принаджуючий потік формується управлінням відкриттям шлюзних воріт. Їх розміри можуть змінюватися, з мінімальної ширини камери і існуючої глибини води до аналогічних їм в басейнових рибоходах. Потреба в кількості води залежить від розмірів камери, циклічних інтервалів для операцій закриття і необхідної інтенсивності принаджуючого потоку. Використовують при високих рівнях і де простір або доступна витрата води обмежені. Планування і будівництво часто є технічно складним. Потребує

великих зусиль в обслуговуванні і роботі, висока вартість споруди і її обслуговування, низьке споживання води. Придатні для дуже великої риби (такої, як наприклад, осетер). Відповідно до сучасних знань придатні для лососевих і риби зі слабкою плавучістю. Менш придатні для придонно живучих і малої риби.

*Рибопідйомник*

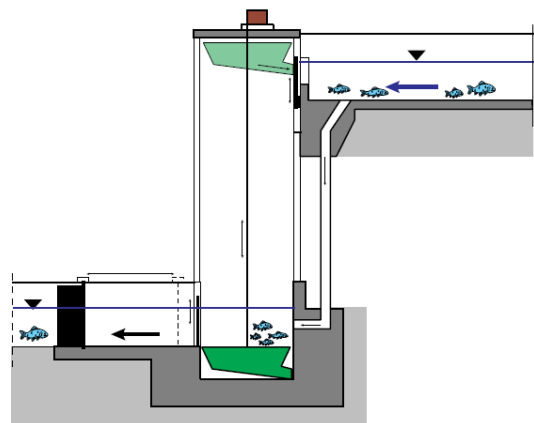


Рис. 9. Рибопідйомник

Підйомний пристрій з механічним керуванням ємності підйомника риби з НБ у ВБ, сполучення до ВБ каналами поступання води через обхід створює принаджуючий потік (рис. 9). Розміри змінні. Об'єм транспортної ємності = 2...4 м<sup>3</sup>. Безперервний потік через обхід є необхідним для створення принаджуючого потоку. Використовується в тих випадках, що і рибоходні шлюзи, але часто тільки цей тип пропуску може бути побудований для висот більше ніж 10 м, для високих дамб. Потребують мало простору. Проектування і будівництво є часто технічно складним. Потребують високих зусиль в обслуговуванні і роботі, висока вартість споруди і обслуговування. Відповідно до останніх досліджень, придатні для лососевих риб з низькою плавальною здатністю і менш придатні для малої риби. Не придатні для придонної міграції риби.

На відміну від класифікації, яка наведена у ВНД 33-2.3-04-01 [2] у європейських практиках дещо інший підхід, причому виражений цілий вид рибопропускних споруд, таких як близькі до природних [3].

REFERENCES

- [1] Fish passes – Desing, dimensions and monitoring. – Rome: FAO, 2002. – 112 p.
- [2] ВНД 33-2.3-04-01. Рибозахисні та рибопропускні споруди. – Введ. 20.08.2001. – Київ: Державний комітет України по водному господарству, - 2001. – 45с.
- [3] Larinier M/ Implantation des passes a poissons / Larinier M. – Bull. Fr. Peche Piscic. 326/327, 1992 – С. 30-44.

# Необхідність та принципи удосконалення методів і засобів планування водокористування при зрошенні

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.006>

Наталія Приходько  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[n.v.prihodko@nuwm.edu.ua](mailto:n.v.prihodko@nuwm.edu.ua)

Анатолій Рокочинський  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[n.v.prihodko@nuwm.edu.ua](mailto:n.v.prihodko@nuwm.edu.ua)

Павло Волк  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[n.v.prihodko@nuwm.edu.ua](mailto:n.v.prihodko@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – У статті розглянуто необхідність та принципи удосконалення методів і засобів планування водокористування при зрошенні. Представлено аналіз міжнародного та вітчизняного досвіду розробки й впровадження інформаційних систем підтримки прийняття управлінських рішень у зрошуваному землеробстві. Наведено загальну характеристику зміни умов та вимог до ведення аграрного виробництва на зрошенні щодо сучасних реалій, які зумовлюють необхідність удосконалення методів і засобів планування водокористування при зрошенні. Запропоновано відповідні рішення.

**Ключові слова** — удосконалення, методи і засоби, планове водокористування, зрошення.

## I. ВСТУП

Ситуація у зрошуваному землеробстві в останні десятиріччя та його подальший розвиток залежать від існуючих викликів, що формуються у водному та сільському господарстві України, відіграючи значну роль у розвитку меліоративної науки та практики. Ці виклики обумовлені змінами навколишнього соціально-економічного та природного середовища: реформами державного управління та окремих секторів економіки, зміною клімату, науковим та інноваційним розвитком, змінами умов водоземлекористування [1; 3 та ін.].

Свого часу з переходом України до ринкової економіки відбулися суттєві зміни в умовах та вимогах щодо ведення усіх форм господарської діяльності, зокрема і аграрного виробництва на зрошенні. Значне зростання вартості матеріально-технічних ресурсів необхідних для реалізації зрошення, а також необхідність залучення інвестицій у реконструкцію та відновлення зрошувальних систем (ЗС), значно підвищило вимоги до управління технологічними процесами у зрошуваному землеробстві.

Як результат виникла необхідність переходу від планування та прийняття рішень за методичними рекомендаціями, зональними технологічними картами та експертними оцінками до планування та прийняття рішень за значно більшою кількістю інформації, зокрема і

про поточний стан посівів та умов їх розвитку, з використанням інформаційних систем (ІС).

На шляху до цього світова наукова спільнота приділяє значну увагу пошуку шляхів та методів підвищення якості прийняття рішень у аграрному виробництві на зрошенні за рахунок впровадження новітніх методів і технологій управління, а також ІС для оперативного планування водокористування при експлуатації ЗС.

Оперативне планування зрошення сільськогосподарських культур на великих ЗС в Україні завжди розглядалось як засіб забезпечення ефективного використання водних та енергетичних ресурсів, підвищення врожаю вирощуваних культур та відповідно збільшення прибутковості господарств.

У зарубіжній та вітчизняній літературі є ряд досліджень, присвячених проблемам розробки методів планування управління зрошенням, слід зазначити наукові роботи вітчизняних учених: Остапчик В.П., Гончаров С.М., Коробченко, Жовтоног О.І., Коваленко П.І., Коквіхіна С.В., Лимарь А.О., Лисогорова С.Д., Мішукова Л.С., Писаренко В.А., Писаренко П. В., Ромко А.В., Собко О.О., Харченко О.В., Штойко Д.А. та багатьох інших [2; 3; 4 та ін.].

Необхідність подальшого розвитку та удосконалення принципів, моделей, методів і засобів оперативного планування водокористування зумовлені постійно зростаючими вимогами до якості й ефективності його виконання через необхідність підвищення загальної ефективності використання ЗС за рахунок оптимізації процесів управління, розширення інформаційного забезпечення, підвищення оперативності, якості і загального рівня технічної експлуатації ЗС.

Аналіз міжнародного досвіду розробки та впровадження ІС підтримки прийняття управлінських рішень у зрошуваному землеробстві свідчить про наступні тенденції при розробці таких систем: надання послуг через мережу Інтернет та мобільні пристрої та розвиток інтерфейсів веб-баз даних у вигляді інтернет-



порталів. До такого типу систем відносяться наступні СППР: IRRINET (Італія), IrtiSatSMS (Австралія), ISS-ITAR (Альбасете, Іспанія), BEWARE (Крит, Греція), Anglia river Basin (Великобританія), IRRISA (Франція), IrtiSat (область Кампанія, Італія) та ін.

При цьому виділяють такі типи ІС: що здійснюють аналіз даних ДЗЗ; що використовують моделювання процесів у середовищі «грунт–рослина–атмосфера»; що ґрунтуються на обробітці даних прямих вимірювань метеорологічних умов, параметрів розвитку рослин та вологості ґрунту за допомогою різних типів датчиків, автоматизованих метеостанцій та приладів.

За даним напрямом в Інституті водних проблем і меліорації НААН розроблено декілька поколінь ІС [2]. Над розвитком цього наукового напрямку працювала та працює ціла плеяда відомих в Україні вчених: Остапчик В.П., Філіпенко Л.А., Жовтоного О.І., Ромащенко М.А., Ковальчук П.І. Так, для вирішення задач оперативного планування зрошення, розроблено інформаційну систему «ГІС-Полив» [5], що у своєму складі геоінформаційні технології, методи наземного та космічного агромоніторингу.

Для оперативної діагностики причин незадовільного стану та розвитку вирощуваних культур у складі ІС «ГІС-Полив» пропонуються моделі та алгоритми, які за даними щотижневих космічних спостережень за динамікою біомаси рослин та листовим індексом, а також на основі результатів моделювання динаміки вологозапасів у ґрунті та потенціалу росту біомаси, розпізнають причини відхилення росту та розвитку рослин від оптимального рівня [6].

І за такими результатами діагностики стану та розвитку рослин пропонуються відповідні оперативні чи довгострокові рішення з удосконалення якості управління технологіями зрошеного землеробства.

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Незважаючи на значну кількість ІС оперативного планування зрошення, більшість потенційних користувачів (фермерів) не використовують ці сучасні інструменти.

Різні дослідження вказують на те, що основними причинами того, що фермери не зацікавлені у застосуванні сучасних інформаційних систем оперативного планування зрошення є труднощі у застосуванні таких систем на практиці, значна вартість їх фактичного використання та не достатній рівень оперативності прийняття рішень в часі, пов'язаний з використанням даних ДЗЗ.

Крім того, усі відомі методи оперативного планування зрошення мають свої переваги та недоліки щодо досягнення високої продуктивності використання поливної води.

Сучасні процеси реформування та інноваційного розвитку в управлінні зрошенням формують нові вимоги та можливості для розвитку методів оперативного планування зрошення, що повинні враховувати просторову і часову мінливість природних та господарських факторів виробництва, а також

процеси: трансформації в управлінні ЗС. Потрібні більш гнучкі системні підходи, що враховуватимуть умови реального виробництва.

Загальним критерієм ефективності управління зрошенням стає критерій її ресурсоефективності, що забезпечує мінімізацію використання ресурсів: за умов досягнення економічно та екологічно сталого рівня господарювання. У міжнародній практиці цей критерій базується на визначенні показника продуктивності використання ресурсів, що оцінюється відношенням обсягів отриманої продукції (прибутків) до обсягів води та інших матеріальних ресурсів, що використані при зрошенні.

За останні роки аграрне виробництво України стикнулося із суттєвими змінами щодо умов та реалій його реалізації. Прогнозоване в умовах змін клімату підвищення температури повітря і посилення його посушливості в цілому, які спостерігаються вже сьогодні, призводять до зменшення природної вологозабезпеченості територій та вологовмісту ґрунтів, збільшення сумарного випаровування й загальної водопотреби при вирощуванні сільськогосподарських культур на зрошуваних землях, що відбувається на фоні зростаючого дефіциту водних ресурсів.

Окрім викликів і загроз, пов'язаних із впливом змін клімату та відповідним загостренням продовольчої, водної та енергетичної криз, ми перебуваємо в умовах військової агресії. Бойові дії вплинули на суттєве скорочення посівних площ, загострення критичного стану проблеми дефіциту водних ресурсів, обмеження у доступі та можливості проведення збору інформації, зокрема і даних ДЗЗ, використання яких лежить в основі більшості сучасних інформаційних систем.

Сучасні зміни умов функціонування ЗС призводять до необхідності зміни й методологічних підходів до їх створення та функціонування, в основу яких повинен бути покладений ресурсний підхід (ресурсна оптимізація) [7], насамперед щодо стратегічної важливості економії водних й енергетичних ресурсів, що визначає необхідність подальшого розвитку зрошення на основі природоорієнтованих та екологоефективних рішень, зокрема шляхом розробки режимно-технологічних й технічних ресурсоощадних заходів і засобів з урахуванням усієї сукупності змінних природно-агро-меліоративних умов.

Виникає необхідність подальшого розвитку та удосконалення наявних принципів, методів, моделей і засобів реалізації планування водорегулювання в зоні зрошення, що зумовлені всезростаючими вимогами до якості й ефективності його виконання щодо оптимізації процесів управління, розширення інформаційного забезпечення, підвищення оперативності, якості і загального рівня технічної експлуатації ЗС.

У зв'язку з цим, у розвиток існуючих підходів та розробок ІС оперативного планування зрошення, а також розроблених на даний час принципів автоматизації планового водорегулювання осушуваних земель [1; 4], нами запропоновано *систему комплексної автоматизації планового*

**водокористування (СКАПВ)**, яка, на відміну від існуючих розробок, дає змогу для діючих зрошувальних систем комплексно та у взаємозв'язку розглядати планове управління шляхом розробки **системних планів водокористування (СПВ)** на довготерміновій основі для стадії технологічної підготовки до наступного сезону (рівень стратегічного планування) та оперативне управління шляхом корегування в умовах реального року СПВ на основі короткотермінових прогнозів (рівень тактичного планування) за рахунок **інформаційних систем оперативного планування водокористування (ІС ОПВ)**.

Таке поєднання дає можливість підвищити ефективність управління водокористуванням при зрошенні через покращення оцінювання різного роду ресурсних можливостей водоземлекористувачів у кожному окремому випадку, насамперед обмеженості доступних і придатних для зрошення водних ресурсів.

### III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Керування водним режимом через водокористування при зрошенні як на рівні меліорованого поля, так і на рівні системи може здійснюватися відповідно до рівнів прийняття рішень в часі у декілька етапів:

1) на стадії технологічної підготовки системи до наступного сезону (рівень стратегічного планування) через розробку **системного плану водокористування (СПВ)** шляхом виконання інженерних прогнозно-оптимізаційних режимних розрахунків на довготерміновій основі за усім спектром схематизованих типових природно-агро-меліоративних умов для планових видів, структури розміщення і врожаїв вирощуваних культур;

2) відповідної реалізації та корегуванні СПВ ЗС через виконання за відповідними моделями аналогічних розрахунків на короткотерміновій основі в оперативному режимі в умовах поточного року (рівень тактичного планування) за фактичними природно-агро-меліоративними умовами.

І хоча розглядаються два різні рівні прийняття рішень в часі, які відносно самостійні, але, водночас, вони і взаємозв'язані між собою. Тому, з одного боку, вони потребують розробки прогнозно-оптимізаційних моделей і методів їх реалізації різного рівня складності та інформаційного забезпечення відповідно до виду прогнозу природно-агро-меліоративних режимів (на довготерміновій чи короткотерміновій основі).

З іншого боку, на цих рівнях, що відповідають одній стадії – експлуатації системи, розглядаються однотипні цілі і задачі з прогновної оцінки водного режиму за різних природно-агро-меліоративних умов та обґрунтування необхідності й доцільності реалізації відповідних технологій за визначеними параметрами необхідних технічних характеристик водокористування на ЗС (норми й терміни подачі або скиду води, відповідні ним витрати, об'єми води тощо).

При цьому ієрархія (підпорядкована черговість) структури виконання необхідних прогнозних режимних розрахунків на цих двох рівнях прийняття рішень в часі стосовно ієрархії технічної структури

побудови системи буде однаковою. Різні типи та конструкції систем як на зрошуваних, так і осушуваних землях за їх технічною структурою побудови, як правило, характеризуються вираженою деревовидною структурою (графом) розташування й підпорядкування її складових технічних елементів (гідротехнічних споруд, насосних станцій, каналів, трубопроводів тощо), що обслуговують меліоровані поля з вирощуваними на них культурами.

Через це вся територія системи розбивається за вузловим принципом управління на балансіві ділянки за кількістю регулюючих гідротехнічних споруд у розподільних вузлах магістрального каналу чи трубопроводу системи. Під **балансовою ділянкою** (БД) мається на увазі частина системи, що обслуговується одним розподільником.

В межах БД розглядаються **балансові підділянки** (БПД), підпорядковані розподільним каналам або трубопроводам нижчого підпорядкування, в межах яких, в свою чергу, розглядаються **балансові модулі** (БМ) або меліоровані поля з плановими чи фактичними посівами вирощуваних культур. Тут подача води на зрошення здійснюється на кожному полі в структурі ССВ, як складової ЗС, через систему відповідних розподільних технічних елементів (каналів чи трубопроводів) найнижчого рівня підпорядкованості.

Звідси прогнозні режимні та оптимізаційні розрахунки, а далі й розробка СПВ ЗС як на довготерміновій, так і короткотерміновій основі виконуються послідовно, відповідно до розглянутої багаторівневої ієрархії починаючи з найнижчого рівня до найвищого.

До того ж, усі ці розрахунки щодо рівня прогнозу ґрунтуються на єдиній базі інформаційного забезпечення, оскільки короткотермінові прогнози природно-агро-кліматичних і меліоративних умов на об'єкті, що розглядається, ґрунтуються, як правило, на сполученні даних багаторічних ретроспективних спостережень і передбачуваних (очікуваних) оперативних даних короткотермінового прогнозу природно-агро-меліоративних умов поточного року.

Все це є достатньою підставою для постановки й розв'язування задачі наскрізного планування водокористування при експлуатації ЗС, тобто створення **комплексної системи планового водокористування** та реалізації **системи комплексної автоматизації планового водокористування (СКАПВ)** при зрошенні на базі ЕОМ.

Така система ґрунтується:

- на розробці СПВ ЗС на довготерміновій основі на стадії технологічної підготовки системи до наступного сезону;
- реалізації та корегуванні СПВ ЗС в умовах реального року на основі короткотермінових прогнозів за рахунок створення й функціонування ІС ОПВ ЗС.

Розробка СПВ ЗС та ІС ОПВ ЗС в структурі створення та реалізації СКАПВ – це, в принципі, самостійні, досить складні й багатопрофільні прогнозно-оптимізаційні задачі науково-виробничого характеру, які потребують ґрунтовного самостійного висвітлення.

Тому, СПВ ЗС можуть розроблятися і розглядатися в складі СКАПВ як самостійне завдання для вироблення стратегії управління системою за невизначених природно-агро-кліматичних умов на наступний сезон. Але вони також можуть служити необхідною нормативно-інформаційною базою для створення й функціонування ІС ОПВ ЗС в умовах поточного року.

**Розробка системних планів водокористування на довготерміновій основі.** При розробці СПВ ЗС завдання зводиться, зрештою, до встановлення термінів і величин потрібних витрат води для відповідних режимів зрошення стосовно складових елементів (меліорованих полів, гідротехнічних споруд, каналів, трубопроводів, насосних станцій тощо) та системи в цілому за усім спектром типових схем погодних умов розрахункових щодо тепло- й вологозабезпеченості періодів вегетації [8]. Завдання виконується за допомогою побудови й реалізації відповідних балансових моделей, які дають змогу отримати диференційовану та інтегральну оцінку умов водокористування на об'єкті в часі і просторі.

При цьому СПВ ЗС розробляються відповідно до загальної універсальної структури реалізації прогнозно-оптимізаційних розрахунків на довготерміновій основі у подекадному розрізі за схематизованих природно-меліоративних умов на конкретному об'єкті, з урахуванням багаторівневої ієрархії їх виконання стосовно технічної та ієрархічної структури побудови системи за такими узагальнюючими блоками (рис. 1).

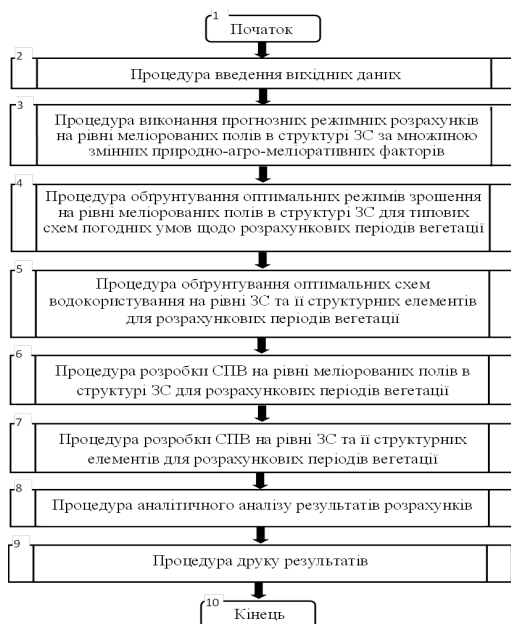


Рисунок 1. Узагальнена структурна блок-схема СПВ ЗС

**Інформаційні системи оперативного планування водокористування.** ІС ОПВ ЗС призначена для підвищення оперативності та якості водокористування, а також його удосконалення при зрошенні за рахунок підвищення рівня технічної експлуатації ЗС на базі метеорологічних і гідрологічних короткотермінових прогнозів в оперативному режимі в умовах поточного року.

Розроблені структура, принципи дії, комплексу моделей, методів та інформаційного забезпечення з їх реалізації, а також комплект програмних засобів і комплекс організаційно-технічних заходів для створення й функціонування ІС ОПВ ЗС (рис. 2), забезпечують стійкий розв'язок основних задач щодо:

- прогнозування фенологічних фаз розвитку вирощуваних культур;
- розрахунок водного режиму та водного балансу активного шару ґрунту з визначенням усіх необхідних складових;
- оптимізації водорозподілу по елементах і системі в цілому у випадку нестачі водних ресурсів; розрахунку витрат і об'ємів води по елементах і системі в цілому;
- накопичення й видача інженерно-технічному персоналу звітної інформації про стан функціонування системи на поточний і прогнозований терміни часу, а також рекомендацій з управління нею.

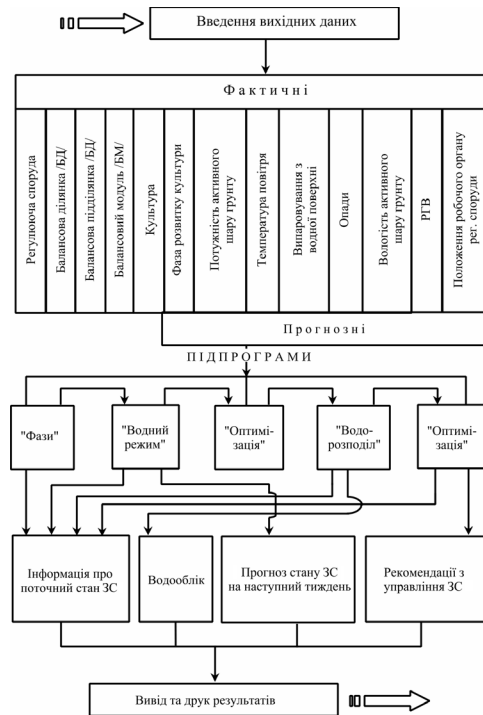


Рис. 2. Узагальнена структурна схема ІС ОПВ ЗС

Організаційна структура виконання прогнозно-оптимізаційних розрахунків для ІС ОПВ ЗС на короткотерміновій основі є повністю тотожною до розглянутої аналогічної структури при розробці СПВ ЗС на довготерміновій основі, тобто вони виконуються також стосовно технічної та ієрархічної структур побудови системи.

Але на відміну від них означені розрахунки виконуються в тижневому розрізі періоду вегетації поточного року, що дуже зручно з точки зору режиму роботи обслуговуючого персоналу ЗС у такому змінно-кроковому прогнозованому і ретроспективному режимах.

Оскільки точність прогнозних розрахунків в оперативному режимі визначається, перш за все, справдовуваністю очікуваного короткотермінового метеопрогнозу на наступний тиждень, то для

усунення виникаючих похибок, після того, як цей тиждень минув, повторно виконуються усі необхідні режимні й інші розрахунки за вимірними ретроспективними фактичними значеннями метеорологічних, агрометеорологічних, меліоративних й інших факторів. Крім того, для реалізації наступних кроків оперативного управління здійснюється також зворотній зв'язок, тобто виконується періодичний контроль вологості ґрунту, фенофаз вирощуваних культур, об'ємів і витрат води через натурні заміри на системі тощо.

Реалізація ІС ОПВ ЗС включає:

1. Збір й первинну обробку вихідних даних щодо фактичного складу і структури посівів вирощуваних сільськогосподарських культур на меліорованих полях, фаз їх розвитку в онтогенезі, початкової і поточної вологості активного шару ґрунту, РГВ, інформації по температурі повітря, опадів, випаровуванню тощо.

2. Реалізацію на ЕОМ розроблених математичних моделей режимних, водобалансових і оптимізаційних розрахунків за очікуваними прогнозними й спостереженими фактичними ретроспективними даними по елементах і системі в цілому з виробленням рекомендацій щодо управління роботою насосних станцій, скидних споруд і т.д.

3. Виконання отриманих рекомендацій наявним інженерно-технічним персоналом ЗС.

За організаційно-технічною структурою побудови, режимом функціонування, рівнем та ефективністю вирішуваних завдань ІС ОПВ ЗС практично повною мірою задовольняє тим вимогам, які висуваються при оперативному управлінні водокористуванням і водорозподілом на зрошуваних землях в умовах поточного року за наявними природно-агро-меліоративними умовами конкретного об'єкту.

#### ВИСНОВКИ

Таким чином, зміна умов функціонування зрошувальних систем та ведення аграрного виробництва в цілому, вимагає удосконалення методів і засобів планування водокористування для вироблення ефективних стратегій управління водними ресурсами при зрошенні.

На сьогодні існує значна кількість інформаційних систем оперативного планування зрошення, які мають свої переваги та недоліки щодо досягнення високої продуктивності використання поливної води. Однак їх використання у сучасних умовах, що за останні роки зазнали суттєвих змін, у зв'язку з низкою об'єктивних причин не здатне забезпечити необхідну якість прийняття рішень.

У першу чергу це стосується відсутності можливості стратегічного планування на довготерміновій основі з урахування усього спектру змінних природно-агро-меліоративних умов.

Виникає необхідність подальшого розвитку та удосконалення наявних принципів, методів, моделей і

засобів реалізації планування водокористування в зоні зрошення, що зумовлені всезростаючими вимогами до якості й ефективності його виконання щодо оптимізації процесів управління, розширення інформаційного забезпечення, підвищення оперативності, якості і загального рівня технічної експлуатації ЗС.

Відповідно на наявних потреб й вимог та у розвиток існуючих напрацювань і розробок запропоновано удосконалену *систему комплексної автоматизації планового водокористування* при зрошенні, яка дає змогу у комплексі та взаємозв'язку розглядати планове й оперативне управління водними ресурсами та ґрунтується на розробці *системних планів водокористування* на довготерміновій основі на стадії технологічної підготовки системи до наступного сезону за усім спектром змінних природно-агро-меліоративних умов та їх подальшому корегуванні в умовах реального року на основі короткотермінових прогнозів за рахунок створення й функціонування *інформаційних систем оперативного планування водокористування*.

Наявність такого інструменту планування водокористування на діючих зрошувальних системах забезпечує можливість підвищення ефективності управлінських рішень при зрошенні через покращення оцінювання різного роду ресурсних можливостей водоземлекористувачів у кожному окремому випадку, насамперед щодо обмеженості доступних і придатних для зрошення водних ресурсів, що відповідає сучасним умовам та вимогам до зрошувального землеробства.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Водний менеджмент в Україні: проблеми та інновації розвитку: [колективна монографія] / за ред. Л.Ф. Кожушка, В.А. Сташук, М.А. Хвесика, А.М. Рокочинського. Рівне, 2018. 638 с.
- [2] Жовтоног О.І., Поліщук В.В. та ін. Оперативне планування зрошення: сучасні виклики, реалії та бачення. *Меліорація і водне господарство*, 2019, (2), С. 55–67.
- [3] Ромащенко М.І. Інформаційне забезпечення зрошувального землеробства. Концепція, структура, методологія організації / М.І. Ромащенко та ін. – Київ: Аграрна наука, 2005. 196 с.
- [4] Рокочинський А.М. Наукові та практичні аспекти оптимізації водорегулювання осушуваних земель на еколого-економічних засадах: монографія / за ред. Ромащенко М.І. Рівне: НУВГП, 2010. 351 с.
- [5] «Комп'ютерна програма «Інформаційна система оперативного планування зрошення ІС «ІС Полив», автори: Жовтоног О.І., Філіпенко Л.А., Деменкова Т.Ф., Бабич В.А., Поліщук В.В. (Свідоцтво про реєстрацію авторських прав на твір» 54650 від 07.05.2014).
- [6] Поліщук В.В., Салок А.Ф., Бутенко Я.О., Жовтоног О.І. Забезпечення якості прийняття рішень у зрошенні за рахунок впровадження інформаційних систем, 2022, С. 178–180.
- [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>
- [8] Посібник до ДБН В.2.4.-1-99 «Меліоративні системи та споруди» (розділ 3. Осушувальні системи). Метеорологічне забезпечення інженерно-меліоративних розрахунків у проєктах будівництва й реконструкції осушувальних систем /А.М. Рокочинський та ін. Київ: ВАТ «Укрводпроєкт», 2008. 63 с.

# Удосконалення технології проектування дренажних систем відповідно до сучасних змінюваних умов та вимог

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.007>

Євген Ромашенко

Національний університет водного господарства та інженерії природокористування  
м. Рівне, Україна  
[e.v.romashchenko@nuwm.edu.ua](mailto:e.v.romashchenko@nuwm.edu.ua)

Олександр Онопко

Національний університет водного господарства та інженерії природокористування  
м. Рівне, Україна  
[o.s.onopko@nuwm.edu.ua](mailto:o.s.onopko@nuwm.edu.ua)

Павло Волк

Національний університет водного господарства та інженерії природокористування  
м. Рівне, Україна  
[p.p.volk@nuwm.edu.ua](mailto:p.p.volk@nuwm.edu.ua)

Анатолій Рокочинський

Національний університет водного господарства та інженерії природокористування  
м. Рівне, Україна  
[a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua](mailto:a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua)

*Анотація* — обґрунтовано, що перехід на оптимізаційні методи визначає об'єктивну необхідність відповідних змін та удосконалення технології проектування дренажних систем. Наявність множинних змінних природно-агро-меліоративних умов реального об'єкта, багаторівневість (багатоваріантність), багатопараметричність, блочність та циклічність реалізації прогнозно-імітаційних й оптимізаційних розрахунків визначають необхідність послідовного обґрунтування за ієрархічною підпорядкованістю режимних, технологічних та конструктивних рішень щодо основних регулюючих елементів і дренажних систем в цілому у їх взаємозв'язку, їх поетапного еколого-економічного та інвестиційного оцінювання. Все це, у свою чергу, також визначає необхідність удосконалення технології проектування дренажних систем на основі поєднання й послідовної реалізації різномірних методів оцінювання технічних, технологічних, економічних й екологічних параметрів різномірних елементів та системи в цілому з відповідними базовими проектними процедурами.

*Ключові слова* — технології; проектування; дренажна система, сучасні умови.

## I. ВСТУП

Головним стратегічним напрямом подальшого розвитку гідромеліорацій в зоні достатнього та нестійкого зволоження України в умовах змін клімату, що визначений «Стратегією зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року», буде всеохоплююча реконструкція і удосконалення існуючих типів й конструкцій дренажних систем (ДС) з метою застосування прогресивних, економічно вигідних та екологічно прийнятних технологій і режимів водорегулювання для досягнення проектного рівня ефективності використання наявного фонду осушуваних земель [2].

## II. МЕТОДИ ТА МАТЕРІАЛИ

Наявна практика вибору конструкції та параметрів насамперед регулюючої, а також провідної мережі осушувальних систем (ОС), ґрунтується на застосуванні достатньо теоретично обґрунтованих й апробованих на виробництві методів розрахунку, в основу яких покладено теоретичні засади руху води в природних і технічних системах, що розглядаються в гідромеханіці і гідравліці (С. Ф. Авер'янов, А. М. Костяков, А. І. Івицький, О. І. Мурашко, О. Я. Олійник, М. Г. Пивовар, В. Т. Климков, М. О. Лазарчук, В. Л. Поляков, А. М. Рокочинський, Р. А. Тумас, Ц. М. Шкінкіс та ін). Вони дають змогу визначити параметри конструктивних елементів ОС на їхню пропускну здатність, обмежену прийнятним рівнем розрахункової забезпеченості (й відповідно надійності і вартості) на розрахунковий період за діючими нормами проектування: для дренажу – від 2...5 до 10% забезпеченості щодо розрахункового модуля дренажного стоку; для магістральних каналів – 10% забезпеченості за розрахунковими витратами (посівна, чи висока літня, чи повенева).

В умовах України це завдання традиційно вирішувалося шляхом виконання прогнозних інженерно-меліоративних розрахунків за загальновідомою водобалансовою моделлю А. М. Янголя [5] на основі оцінювання вегетаційного значення показника водного балансу для середнього (50%), сухого (75%) та гостропосушливого (90%) розрахункових років за умовами забезпеченості опадів.

Це дозволяло приймати у досліджуваних умовах реального об'єкта такі технології як осушення, попереджувальне шлюзування та двобічне регулювання водного режиму осушуваних земель з відповідним типом й конструкцією ДС. На той момент часу це було безперечним кроком вперед у теорії і практиці реалізації прогнозних водобалансових розрахунків, які дозволяли з

певним рівнем детальності і точності прийняти тип та конструкцію ДС на моноваріантній основі [6].

Однак реалізація даного підходу дозволяла отримати фактично безальтернативний результат щодо оцінки ефективності застосування можливих технологій водорегулювання осушуваних земель в конкретних природно-агро-меліоративних умовах реального об'єкта. Крім того, параметри складових технічних елементів і системи в цілому визначалися на підставі нормування рівня розрахункової забезпеченості, що знижувало об'єктивність обґрунтованість і загальну ефективність даних рішень.

Таким чином, водобалансові розрахунки давали змогу уточнити проектне рішення (ПР) щодо типу, конструкції ДС в заданих умовах. За тим, згідно з базовими проектними процедурами, розроблявся робочий проект ДС за уточненим технічним та технологічним рішенням з водорегулювання осушуваних земель, визначалися їх основні питомі техніко-економічні показники (проектна вартість системи, експлуатаційні витрати тощо), економічна ефективність в цілому та доцільність його реалізації.

Реалізація такого підходу дозволяла обґрунтувати необхідність періодичного зволоження осушуваних земель у посушливі періоди вегетації, але не давала при цьому конкретної оцінки ефективності застосування різних можливих технологій водорегулювання: від осушення до попереджувального шлюзування, підґрунтового зволоження чи зрошення дощуванням, або можливих їх комбінацій в межах системи

У подальшому, для усунення цього недоліку та в розвитку існуючого підходу, була розроблена й удосконалена методика оцінювання технологічної ефективності застосування різних можливих технологій водорегулювання залежно від природно-агро-меліоративних умов об'єкта осушення. Це стало можливо завдяки введенню у водобалансову модель А. М. Янголя показника вологообміну активного кореневмісного шару ґрунту (0,5 м) та її реалізації з помісячним кроком дискретизації щодо розрахункових років.

### III. РЕЗУЛЬТАТИ

Вирішення складних міждисциплінарних, багатофункціональних і багатопараметричних завдань щодо зміни підходів до створення та функціонування водогосподарсько-меліоративних об'єктів, удосконалення технологій водорегулювання, відповідно типів, конструкції й параметрів ДС та їх технічних елементів можливе тільки завдяки переходу від традиційних переважно моноваріантних підходів на оптимізаційні методи, які визначають необхідність зміни та удосконалення технології проектування ДС на основі реалізації базових проектних процедур за основними етапами їх розробки з використання різних методів, сучасних інформаційних і комп'ютерних технологій [8].

Сучасною методологічною основою та, одночасно, універсальним технічним інструментом, який дозволяє удосконалювати практику проектування складних об'єктів і систем, що сьогодні успішно використовуються і розвиваються практично в усіх галузях науки, техніки і промисловості, є традиційні системи автоматизованого проектування (САПР) або сучасні BIM- технології проектування [9].



Рис.1. Схема процесу проектування за базовими проектними процедурами на багатоваріантній основі за системною оптимізацією

У структурному відношенні САПР представляє собою організаційно-технічний комплекс, що складається з великої кількості взаємозв'язаних і взаємодіючих компонентів. Головною функцією



САПР є здійснення автоматизованого проектування об'єктів та їх складових елементів на основі застосування математичних й інших моделей, автоматизованих проектних процедур і засобів обчислювальної техніки [4,9].

Застосування САПР при проектуванні ДС потребує, в першу чергу, уточнення базових проектних процедур, що пов'язане з поетапним оцінюванням варіантів ПР, вибором найкращого з них на багатоваріантній основі із застосуванням методів системної оптимізації (рис.1).

### 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 еколого-економічних засадах: Монографія/ За редакцією академіка УААН. Ромашенка 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., Kuzmich, 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.
- [9] Rokochinskiy A., Jeznach J., Volk P., Turcheniuk V., Frolenkova N., Koptiuk R. Reclamation projects development improvement technology considering optimization of drained lands water regulation based on BIM / / Scientific Review Engineering and Environmental Sciences, 28 Issue 3(85)-2019, 432-443. – Режим доступу: [http://iks\\_pn.sggw.pl/PN85/A11/zeszyt85art11en.html](http://iks_pn.sggw.pl/PN85/A11/zeszyt85art11en.html).

# До питання вибору способу відновлення використання водних ресурсів та втраченого гідроенергетичного потенціалу в межах колишнього Каховського водосховища

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.008>

Дмитро Стефанишин  
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України  
Київ, Україна  
[d.v.stefanyshyn@gmail.com](mailto:d.v.stefanyshyn@gmail.com)

Василь Корбутяк  
Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[v.m.korbutiak@nuwm.edu.ua](mailto:v.m.korbutiak@nuwm.edu.ua)

Данило Бенатов  
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського  
Київ, Україна  
[daniel@benatov.kiev.ua](mailto:daniel@benatov.kiev.ua)

**Анотація** – На основі аналізу уроків створення і експлуатації Каховського водосховища в довоєнний період та наслідків катастрофи на Каховському гідровузлі в 2023 році в результаті підриву його гідроспоруд російськими військами, запропоновано альтернативний підхід до відновлення використання в межах колишнього водосховища водних ресурсів та втраченого гідроенергетичного потенціалу нижнього Дніпра. Запропонований підхід ґрунтується на ідеї напрацювання компромісів при впровадженні принципів інтегрованого управління водними ресурсами, диверсифікації ризиків та використання природоорієнтованих рішень. В якості альтернативи відновленню Каховського водосховища і Каховської гідроелектростанції пропонується схема з декількох невеликих водосховищ та гідроелектростанцій в межах колишнього водосховища і певна кількість (за потребою) водосховищ наливного типу на берегах Дніпра, а в межах Конських і Базавлуцьких плавнів – створення штучних русел з суміщенням в них функцій водопропускних споруд і рибохідних каналів.

**Ключові слова** – відбудова; диверсифікація ризиків; Каховське водосховище; компроміси; природоорієнтовані рішення.

## I. ВСТУП

Дискусії, на національному і міжнародному рівнях, щодо того в який спосіб має відбуватися повоєнна відбудова України, на яких ідеях, принципах і підходах мають ґрунтуватися прийняті рішення, які пріоритети в ці рішення мають закладатися, які практики використовуватися при їх впровадженні та які проблеми і в якому порядку вирішуватися, розпочалися практично відразу після повномасштабного вторгнення російських військ в країну, незважаючи на активізацію бойових дій та

невизначеність всіх політичних, соціальних, економічних та екологічних наслідків війни [1, 2].

Серед першочергових, стратегічних пріоритетів в ході численних дискусій виділялися: ревіталізація життєвого простору в межах країни і окремих міст та громад, відновлення критичної інфраструктури, відбудова енергетичного сектору, сільського і водного господарства, транспорту, реформування національної правової системи і освіти, розширення і стимулювання децентралізації, впровадження технологічних інновацій, підтримка наукових досліджень, екологізація природокористування тощо [1-3]. Практично в усіх сферах суспільного життя країни війна виявила як нові, так і загострила вже існуючі проблеми, ігнорувати які в повоєнний час буде вже неможливо.

Одним з викликів повоєнної відбудови України може стати ревіталізація життєвого простору на півдні країни, соціально-економічний розвиток якого в довоєнний період в значній мірі відбувався завдяки водним ресурсам Каховського водосховища. Підрив у червні 2023 р. російськими окупаційними військами гідроспоруд Каховського гідровузла призвів до катастрофи, наслідки якої проявилися в різних вимірах: локальному і глобальному, соціально-політичному, соціально-економічному, екологічному, геологічному, географічному [4-7]. В довгостроковій перспективі ці наслідки можуть посилитися, якщо буде обрано невдалий спосіб відбудови інфраструктури, відновлення територій і сфер народного господарства, місцевих громад, що залежали від Каховського водосховища, не буде належним чином проаналізовано і враховано уроки, винесені з досвіду його створення і експлуатації, та власне катастрофи, що сталася [7-10].



II. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА КАХОВСЬКОГО ГІДРОВУЗЛА, ЙОГО РОЛІ І ВТРАЧЕНИХ ПЕРСПЕКТИВ В СИСТЕМІ НАРОДНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

Каховський гідровузол на р. Дніпро у складі гідроелектростанції (ГЕС) потужністю 334,8 МВт, будівля якої входила до напірного фронту і була суміщена з донними водоскидами, бетонної водозливної греблі, однокамерного судноплавного шлюзу, земляних гребель (руслової греблі, греблі між будівлею ГЕС та судноплавним шлюзом, лівобережними заплавною і надзаплавною греблями) було побудовано у 1952-1959 роках. Основною метою його будівництва було створення великого водосховища для забезпечення водою індустріалізації і розвитку аграрного сектору на півдні України, включно і Криму. Каховський гідровузол став другим на Дніпрі після гідровузла Дніпровської ГЕС (Дніпрогесу), а після розбудови в 1960-1970 роках Дніпровського каскаду гідровузлів – його останньою шостою сходинкою вниз за течією. Каховське водосховище було найбільшим в країні за об'ємом і другим за площею водної поверхні після Кременчуцького. Його повний об'єм при нормальному підпірному рівні сягав 18,2 км<sup>3</sup> (це майже третина повної ємності всіх вітчизняних водосховищ), корисний – 6,8 км<sup>3</sup> (до 25% загальної їх корисної ємності); площа водної поверхні – 2155 км<sup>2</sup>. Максимальна висота греблі становила 30 м.

Каховський гідровузол забезпечував комплексне використання водних ресурсів Дніпра – в цілях енергетики і гідроенергетики зокрема, іригації, комунального і технічного водопостачання, водного транспорту, рибного господарства і рекреації [11]. В цілому, соціально-економічний розвиток півдня України в значній мірі залежав від Каховського водосховища. Сумарна встановлена потужність електрогенерації розміщеної на базі його водних ресурсів на 2020 р. (Каховська ГЕС, Запорізькі АЕС і ГЕС, Зеленодольська ГЕС) становила майже 17% від всієї встановленої потужності електростанцій країни [7]. Водосховище забезпечувало надійне функціонування 31 системи зрошення: до 30% полів Дніпропетровської, 94% – Херсонської, 74% – Запорізької областей [9]. Хоча власне Каховська ГЕС і мала найменшу встановлену потужність серед великих ГЕС Дніпровського каскаду, її частка складала до 8,5% його встановленої потужності і 7,1% всіх вітчизняних ГЕС, включно з малими. У Об'єднаній енергосистемі країни Каховська ГЕС слугувала надійним виробником електроенергії (середньорічне виробництво електроенергії на ГЕС сягало майже 15% від всіх ГЕС Дніпровського каскаду), а також в якості високоманеврового регулятора і аварійного резерву потужності [9].

В планах компанії-оператора Каховської ГЕС (ПрАТ «Укргідроенерго») було її розширення за рахунок побудови Каховської ГЕС-2 у складі напірних гідроспоруд та водосховища Каховського гідровузла (за прикладом Дніпровської ГЕС-2) зі збільшенням встановленої потужності на 200-250 МВт. Для успішної реалізації такого рішення існували всі належні умови [12, 13]. Так, результати прогнозу можливої аварії на гідровузлі з проривом напірного фронту [12] показували, що всі сім напірних гідроспоруд, які формували його напірний

фронт, і Каховський гідровузол в цілому, були достатньо надійними об'єктами – як в умовах розрахункових навантажень і впливів, так і з врахуванням перевантажень внаслідок можливого переповнення водосховища, а також сейсмічних впливів. В свою чергу, за оцінками [13], з усіх можливих варіантів введення нових потужностей гідрогенерації на ГЕС в Україні будівництво Каховської ГЕС-2 в межах реалізації другого етапу реконструкції ГЕС Дніпровського і Дністровського каскадів виглядало найбільш доцільною (найменш ризикованою) альтернативою, зокрема в порівнянні з будівництвом каскаду Верхньодністровських ГЕС на Дністрі та розвитком малої гідроенергетики. Існували також перспективні плани використання ресурсів Каховського водосховища для виробництва «зеленого» водню з будівництвом сонячних і вітрових електростанцій на його берегах та в межах акваторії [7], що теж можна розглядати в контексті втрачених можливостей внаслідок аварії.

III. ПРО ДЕЯКІ УРОКИ КАХОВСЬКОЇ КАТАСТРОФИ

Більшість експертів, а також водокористувачів, серед яких і гідроенергетики, котрі відстоюють ідею відновлення Каховського водосховища, в першу чергу апелюють до проблеми забезпечення водою в повоєнний період населення і економіки півдня України. До війни в цьому регіоні проживала велика кількість населення, як міського, так і сільського, і це населення, безперечно, потребуватиме доступу до води. В кращому випадку, відсутність Каховського водосховища може спонукати водокористувачів до самостійних рішень щодо забезпечення водою, і ці рішення не завжди будуть доцільними і екологічно безпечними [7]. В гіршому випадку Україну може чекати масова зворотна міграція населення з півдня країни в її центральні, північні та західні регіони. В умовах змін клімату та виснаження водних ресурсів, особливо поверхневих, практично в усіх регіонах країни це створить нові проблеми, пов'язані з забезпеченням населення і економіки водою.

Будь-яка господарча чи інша діяльність при природокористуванні завжди виправдовувалася, виправдовується і буде виправдовуватися «благими намірами»: поліпшенням соціально-економічних умов життя людей, наданням їм кращих послуг тощо. Нерідко це закінчувалося прорахунками і прийняттям помилкових рішень, і не завжди лише через недостатні знання про можливі їх наслідки. При розробці нових рішень важливо враховувати уроки минулого й зважати на всі можливі наслідки. Серед різних уроків, пов'язаних з катастрофою на Каховському водосховищі, при розробці й аналізі альтернатив та прийнятті остаточних рішень на нашу думку слід виділити наступні.

A. Урок 1

Проект, в якому не враховувалися національні інтереси, інтереси автохтонного населення, може так і не стати такою цінністю для вільного суспільства, щоб його втрата однозначно сприймалася як національна трагедія. Чи розглядають українці Каховське водосховище, власне як і весь каскад водосховищ на Дніпрі і Дністрі, справжніми національними проектами? При їх реалізації в країні

було затоплено території загальною площею майже в Чернівецьку область. Чи могло з'явитися Каховське водосховище у вигляді, яким воно було до катастрофи, в інших історичних умовах? Слід визнати, що частина інтелектуалів країни, і не лише ті, котрі активно ратують проти відновлення водосховища, сприймає цю катастрофу з позиції «не було б щастя, то нещастя допомогло».

### *В. Урок 2*

Прості рішення зазвичай виправдовуються швидким вирішенням складних проблем. У випадку з Каховським гідровузлом воно досягалося за рахунок зосередження у водосховищі великого об'єму води, що забезпечувало достатньо простий доступ до водних ресурсів для багатьох споживачів на значній території півдня країни. Прості підходи до проблем приваблюють носіїв рішень, котрі не схильні шукати компроміси, оскільки компроміси можуть ускладнювати прийняття рішення по суті, потребують врахування різних, в тому числі і взаємовиключних факторів та критеріїв. Однак прості рішення здатні не лише концентрувати, але і знецінювати ресурс, створювати ілюзію доступу до дешевого і практично необмеженого ресурсу, можливості одночасної реалізації на його базі взаємовиключних цілей. В результаті наступає критична залежність від ресурсу.

### *С. Урок 3*

Будь-який ресурс завжди обмежений і право на користування ним мають всі зацікавлені особи в різних сферах життєдіяльності людини. Це має прийматися носіями рішення як аксіома. В умовах обмеженості ресурсу, для того щоб підвищити ефективність його використання, в тому числі і за рахунок зменшення потенційної шкоди довкіллю тощо, слід забезпечити диверсифікацію ризиків. Це потребує застосування принципу заміщення цілей, коли без компромісів, іноді жорстких, неможливо обійтися. При цьому приріст вигоди в межах окремої діяльності може вести до суттєвого збільшення витрат на неї, включно до збільшення ризику потенційних комерційних збитків. Власне такий стан зазвичай і є ознакою того, що прийняття рішення ґрунтується на компромісі.

## IV. ЯКИМИ МОЖУТЬ БУТИ РІШЕННЯ

Обговорення різних варіантів дій в повоєнний час щодо майбутнього Каховського водосховища розпочалося відразу після катастрофи 2023 року. Здебільшого мова йде про три альтернативні підходи [4, 8-10, 14]: 1) відбудова Каховської ГЕС, в тому числі зі збільшенням її потужності, з відновленням Каховського водосховища в його попередньому статусі (розрахункових рівнів води, об'єму водосховища, які були до катастрофи); 2) відмова від відновлення ГЕС та водосховища, в тому числі з можливим використанням території бувшого водосховища задля інших цілей; 3) подолання неминучих, досить складних соціально-економічних і екологічних викликів, пов'язаних з втратою Каховського водосховища і ГЕС, на основі певних компромісних рішень в межах відбудови Каховської

ГЕС або каскаду ГЕС з невеликими водосховищами з вирішенням супутніх екологічних проблем.

Більшість з пропонуванних рішень, окрім відмови від відновлення ГЕС і водосховища, наразі можуть розглядатися лише як наміри [9], що пояснюється зрозумілою причиною – окупацією зруйнованих споруд Каховського гідровузла та більшої частини території, яка була затоплена водосховищем, ворогом та неможливістю відновлення нормального господарювання на вільних від ворога територіях, які все ще перебувають під постійною загрозою обстрілів з боку російських військ. В принципі, якщо враховувати минулі прорахунки [7, 8-10, 14], допущені при будівництві Каховського гідровузла, і при цьому притримуватися стратегії досягнення цілей сталого розвитку півдня країни та зважати на інтереси місцевих громад, то в першу чергу мають розглядатися саме варіанти компромісних рішень.

### *А. Реалізація принципів інтегрованого управління водними ресурсами та диверсифікація ризиків*

Основні принципи інтегрованого управління водними ресурсами (ІУВР) було закладено на Дублінській конференції щодо водних ресурсів та сталого розвитку в 1992 р. [15]. Згідно з ними вода розглядається як обмежений і вичерпний ресурс, який має економічну, екологічну і соціальну цінність, право на доступ до якого повинні мати різні водокористувачі. Рішення в межах ІУВР мають прийматися на басейновому рівні за максимального сприяння ефективному використанню водних та інших природних ресурсів на користь сталого забезпечення стійкості природних екосистем та вимог суспільства у воді. Наявність каскаду розташованих вище за течією водосховищ на Дніпрі дозволяє спростити завдання ІУВР Дніпра в його нижній течії. Окрім того, в межах колишнього водосховища може бути побудовано декілька менших водосховищ руслового типу, а також певна кількість (за потребою) водосховищ наливного типу на берегах Дніпра. Ці водосховища урізноманітнять джерела водопостачання, збалансують інтереси незалежних водокористувачів, спростять завдання раціонального використання водних ресурсів, в тому числі і завдання регулювання стоку, і, відповідно, сприятимуть диверсифікації ризиків [9]. Водночас, замість однієї великої ГЕС може бути побудовано кілька менших; одну з них, дериваційного типу, – в межах острова Хортиця (див. нижче рис. 1). Це дозволить більш повно і ефективно використати гідроенергетичний потенціал за рахунок зменшення ділянок поширення підпору у верхів'ях водосховищ.

### *В. Застосування природоорієнтованих рішень*

Будівництво в межах Хортиці дериваційної ГЕС (рис. 1) також може розглядатися як одне з природоорієнтованих рішень, де в якості деривації слугуватиме природний рукав, що відділяє острів від правого берега Дніпра.



Рис. 1. Ілюстративний приклад розміщення дериваційної ГЕС в межах острова Хортиця в м. Запоріжжя (модель SAVI на основі Landsat 8 від 14.07.2024)

Інший ілюстративний приклад застосування природоорієнтованого рішення наведено на рис. 2, де показано варіант розміщення руслової ГЕС на Дніпрі та обхідного рибохідного каналу у вигляді штучного русла-рукава в межах Конських плавнів Великого Лугу. Цей канал може також виконувати функції водопропускної споруди, зокрема з метою підводу води до водоспоживачів на лівобережжі колишнього водосховища. По трасі каналу можуть облаштовуватися озера, затоки і протоки, а також насосні станції для заповнення берегових наливних водосховищ тощо.



Рис. 2. Ілюстративний приклад облаштування обхідного водопропускного і рибохідного каналу (модель SAVI на основі Landsat 8 від 14.07.2024)

Подібний канал, максимально наближений за гідроморфометрією до природного русла, було побудовано в 2015-2016 роках на ГЕС Оттенсхайм-Вільгерінг на річці Дунай в Австрії. Потужність ГЕС – 179 МВт, напір – 10,5 м. Протяжність каналу – 14,2 км. Середня витрата води в місці впадіння каналу в Дунай – 17 м<sup>3</sup>/с. Канал було побудовано за 14 місяців приблизно за 8 млн. євро [16].

## ВИСНОВОК

При розробці планів повоєнного відновлення втрачених ресурсів Каховського водосховища мають розглядатися різні альтернативи, і в першу чергу ті, які ґрунтуються на компромісах.

## REFERENCES

- [1] “Відбудова України: принципи та політика,” за ред. Ю. Городніченка, І. Сологуб, Б. Ведер ді Мауро. Парижський звіт 1, Centre for Economic Policy Research, 2022.
- [2] “Відбудова для розвитку: зарубіжний досвід та українські перспективи,” редколегія, голова - В. В. Небрат. НАН України, ДУ “Ін-т екон. та прогнозів. НАНУ”, Київ, 2023.
- [3] “Інноваційні основи відновлення та розвитку країн після збройних конфліктів,” за ред. В. А. Омеляненка. Ін-т стратегій інн. розвитку і трансферу знань, Суми, 2022.
- [4] S. O. Afanasyev, “About the ecological consequences of the destruction of the Kakhovska HPP dam,” *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, 11, 2023, pp. 71-80.
- [5] V. Vyshnevskiy, S. Shevchuk, V. Komorin, Yu. Oleynik, and P. Gleick, P., “The destruction of the Kakhovka dam and its consequences,” *Water International*, 2023.
- [6] H. Napich, and D. Onoprienko, “Ecology and economics of irrigation in the south of Ukraine following destruction of the Kakhov reservoir,” *International Journal of Environmental Studies*, 81 (1), 2024, pp. 301–314.
- [7] Д. В. Стефанишин, Д. Е. Бенатов, “Катастрофа на Каховському водосховищі: причини і наслідки, які не обговорюють,” *Мат. XXIII Міжн. наук.-практ. конф. “Екологія. Людина. Суспільство”*, Київ, 7 грудня 2023 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023, С. 244–247.
- [8] С. О. Яковлев, О. Г. Рогожин, Д. В. Стефанишин, Д. Л. Крета, “Еколого-геологічні і економічні наслідки створення, осушення та можливих варіантів відновлення Каховського водосховища,” *Екологічна безпека та природокористування*, Вип. 4 (48), С. 91-115.
- [9] Д. Стефанишин, В. Корбутяк, Д. Бенатов, Д. Крета, О. Рогожин, Є. Яковлев, “До питання повоєнної відбудови Каховського гідровузла,” *Мат. XXIV Міжн. наук.-практ. конф. “Екологія. Людина. Суспільство”*, Київ, 5 червня 2024 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024, С. 273-279.
- [10] Ye. Yakovliev, O. Rogozhin, D. Stefanyshyn, D. Kreta, Ye. Anpilova, and M. Myrontsov, “Environmental and Geological Hazards After the Explosion of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant and Rehabilitation Options,” in “Systems, Decision and Control in Energy VI,” Vol. II: Power Engng and Env. Safety, Eds V. Babak, A. Zaporozhets, Springer, 2024.
- [11] В. В. Путренко, Д. Е. Бенатов, Д. В. Стефанишин, “Геоінформаційна система “Гідровузли України” – важливий елемент підтримки управлінських процедур,” *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 1 (3 (79)), 2016, С. 46-53.
- [12] D. Stefanyshyn, and D. Benatov, “Application of a logical-probabilistic method of failure and fault trees for predicting emergency situations at pressure hydraulic facilities (The case of Kakhovka hydroelectric complex),” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/2 (106), 2020, pp. 55–69.
- [13] D. V. Stefanyshyn, “Feasibility analysis of construction of new hydropower plants in Ukraine taking into account the risk of unused possibilities,” *Env. Safety and Nat. Resources*, 31 (3), 2019, pp. 33–45.
- [14] “Сталий розвиток – XXI століття. Дискусії 2023,” *Мат. VIII Міжн. наук.-практ. конф.*, НАУКМА, Київ.
- [15] The Dublin Statement on Water and Sustainable Development. URL: <https://www.gdrc.org/uem/water/dublin-statement.html>.
- [16] G. Zauner, M. Jung, W. Lauber, M. Mühlbauer, and C. Ratschan, “Dynamischer Umgebungsarm Donaukraftwerk Ottensheim-Wilhering – Durchgängigkeit und Lebensraum,” *Wasserwirtschaft* 107(12), 2017, ss. 51-57.

# Вплив захисного фільтруючого матеріалу на водоприймальну здатність дренажних осушувально-зволожувальних систем у торфових ґрунтах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.009>

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

Ілона Панасюк, студентка  
Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
panasiuk\_vg23@nuwm.edu.ua

Станіслав Богельський, студент  
Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
bohelskyi\_vg23@nuwm.edu.ua

**Анотація** – Проаналізовано наукові роботи щодо дослідження фільтраційних процесів у ґрунтах в навколодренній області дренажних систем. Досліджено вплив захисного фільтруючого матеріалу повсті на водоприймальну здатність дренажних систем, які працюють у циклічному режимі у торфовому ґрунті.

**Ключові слова** – осушувально-зволожувальна система; дренаж; водоприймальна здатність; фільтр; коефіцієнт фільтрації

Фізичне моделювання водоприймальної здатності дренажних систем відображає фільтраційні процеси в ґрунті та навколодренній області.

Дослідження фільтраційних процесів дренажних систем довели суттєву відмінність коефіцієнта фільтрації ґрунтів у навколодренній зоні дренажних систем. Головним фактором цих відмінностей автори [1] вважають суфозійність ґрунту та переорієнтацію частинок ґрунту в придренній зоні.

На дренажних системах, де ґрунтові води мають закисне залізо (понад 3 мг/л), що характерно для торфових ґрунтів, виникає загроза замулювання дренажу залістими сполуками. Під час осушення і аерації розчинені закисні форми заліза переходять у нерозчинені окисли, що випадають в осад. Такого замулення зазнає у першу чергу пластмасовий дренаж, тому на об'єктах, у ґрунтових водах, в яких є понад 5 мг/л закисного заліза, пластмасові дренажі не влаштовують. [2, 3]

Замулювання це повна або часткова закупорка порожнин труб (мінеральними частинками ґрунту, органічними сполуками, відкладеннями залістих сполук і мінеральних солей), кольматаж водоприймальних отворів в трубах, захисних фільтрів. На практиці найбільш часто зустрічається

механічне замулювання – винос дрібних частинок ґрунту в порожнину труб і кольмотація захисних фільтруючих матеріалів.

Для запобігання замулювання, а також для захисту від проникнення всередину труби дрібних частинок ґрунту застосовують захисні фільтруючі матеріали з повсті, геотекстилю тощо. Захисний фільтруючий матеріал повинен пропускати воду і відсівати ґрунт (при цьому не замулювати сам себе, збільшуючи опір воді), не рватися, володіти біо і хімічною стійкістю протягом всього терміну експлуатації. Рулонні геотекстильні матеріали набули широкого поширення завдяки зручності використання в якості фільтруючих мембран трубчастого дренажу.

В роботі [4] досліджувалась водоприймальна здатність гончарних дренажних систем з фільтромуктами в торф'яному ґрунті упродовж 188 діб. У результаті виявлена достатньо чітка варіація витрат дренажних систем при незмінних всіх параметрах (напір, ґрунт). Дослідами [4] встановлено, що зменшення водоприймальної здатності дренажних систем спричинювалось кольматацією муфт-фільтрів гелеподібними частинками, які зі стохастичною закономірністю виносились в дренаж, внаслідок чого водоприймальна здатність дренажних систем змінювалась.

Для дослідження водоприймальної здатності дренажних систем у торфових ґрунтах виконано 2 серії дослідів (дренажні системи з гончарних труб). Захисні фільтри влаштовували з синтетичних матеріалів – повсті.

Тривалість режимів осушення та зволоження обиралася такою, щоб вона була подібною до режиму осушення та зволоження в реальних

умовах, тобто у весняний період осушення до 14 діб, у літній період способом наповнення дренажних каналів 6–10 діб.

Моделювання режиму осушення виконувалося за схемою роботи підрусової дренажної системи. Режим підрусової дренажної системи є самим важким для дренажу [5].

Оскільки в реальних умовах при зволоженні за допомогою дренажних систем рівень ґрунтових вод піднімається в ґрунті тільки на потрібну для рослин величину, тобто не доходить до поверхні ґрунту, то подачу води в дренаж з виходом води на поверхню ґрунту, можна тільки умовно називати “режим зволоження”. По суті – це є фільтрація знизу вгору.

Дослідження виконано у деревно-осоковому торф'яному ґрунті. Середній коефіцієнт фільтрації торф'яного ґрунту - 4,4 м/добу.

Характеристика серій дослідів наведено у табл.1.

До початку досліджень визначено фільтраційні характеристики захисного фільтра, які наведені у табл. 2.

TABLE I. ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРІЙ ДОСЛІДІВ

Серія	Режим роботи	Матеріал дренажної системи	Матеріал фільтра та спосіб його влаштування	Тип ґрунту
1	Осушення	Гончарні труби	Повість на стиках $\delta = 4...6\text{мм}$	Торф
2	Осушення-зволоження	Гончарні труби	Повість на стиках $\delta = 4...6\text{мм}$	Торф

TABLE II. ФІЛЬТРАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАХИСНИХ ФІЛЬТРІВ ПЕРЕД ДОСЛІДАМИ

Матеріал фільтра	Товщина фільтра, мм	Напір, см	Градiєнт напору	$k_f$ , м/добу	$\sigma_k$ , м/добу
Повість	4...6	39...72	1,3...10	48	8

Порівнюючи значення коефіцієнтів фільтрації захисних фільтрів (табл.1) з коефіцієнтами фільтрації дослідного ґрунту, видно, що останні на 1 порядок менші. Отже, повстяну тканину можна застосовувати як захисні фільтри для меліоративного дренажу.

Аналіз результатів досліджень, показав, що у всіх серіях спостерігалось коливання витрат дренажних систем протягом кожного з циклів з повільним зменшенням витрат як у режимі осушення так і у режимі зволоження. При цьому після циклу зволоження, на початку нового циклу осушення, витрати дренажних систем збільшувались, але не досягали за величиною витрат, які були на початку попереднього циклу осушення. Це явище можна пояснити накопиченням дуже мілких частинок у фільтрі і частковою їх міграцією в дренаж та з дренажу в фільтри при режимі зволоження. Таке припущення підтверджується спостереженнями за роботою дренажних систем в торф'яному ґрунті (серій 1, 2). У фільтрах цих дренажних систем накопичувалася гелеподібна

органічна речовина, яка з часом виносилась в дренаж.

Отже можна припустити, що “безпричинне” збільшення або зменшення водоприймальної здатності дренажних систем і в натурних умовах відбувається за рахунок накопичення дуже мілких частинок у фільтрах, які з часом під дією градієнтів напору мігрують в дренаж і виносяться потоком з дренажної системи.

Тому, тільки за відсутності осаду в дренажах після кількох років експлуатації [9], не можна з впевненістю зробити висновки, що упродовж всього терміну роботи дренаж забезпечував розрахункові параметри (час відведення надлишкової води та необхідні рівні ґрунтових вод).

Відсутність осаду в дренажах після кількох років експлуатації можна пояснити тим, що гідравлічна крупність мілких частинок, які проходять через фільтр є меншою, ніж середні швидкості потоку води в дренажах.

З метою часткової перевірки цього твердження та визначення коефіцієнтів фільтрації захисних фільтрів була розкопана дренажна система дослідів 1 (дренаж в торфі).

Результати досліджень коефіцієнтів фільтрації захисних фільтрів після їх експлуатації в циклічних режимах наведені в табл.3.

TABLE III. ФІЛЬТРАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАХИСНИХ ФІЛЬТРІВ ПІСЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДОПРИЙМАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ДРЕН

Матеріал фільтра	ґрунт, серія	Напір, см	Градiєнт напору	$k_f$ , м/добу	$\sigma_k$ , м/добу
Повість	Торф, серія 1	40...63	1,3...10	114	45

Порівнюючи значення коефіцієнтів фільтрації чистих захисних фільтрів з коефіцієнтами фільтрації цих фільтрів після проведення досліджень отримано, що коефіцієнт фільтрації коефіцієнт фільтрації повстяної тканини у торф'яному ґрунті зменшився у 2,3 рази. Проте, коефіцієнти фільтрації захисного фільтра залишилися у 10 разів більшими, ніж коефіцієнт фільтрації дослідного ґрунту. Отже, зменшення водоприймальної здатності дренажних систем у торфових ґрунтах не можна віднести на рахунок колювальної дії фільтрів.

Отже, можна зробити такі припущення:

1. Залежно від типу захисних фільтрів дуже мілкі частинки попадають через фільтр в дренаж і виносяться потоком води за межі дренажної системи.

2. В придренній зоні можуть накопичуватись мілкі частинки, які спричиняють зменшення коефіцієнта фільтрації ґрунту, а тому і зменшення водоприймальної здатності дренажних систем упродовж експлуатації.

3. Неповне відновлення водоприймальної здатності дренажних систем при зміні режимів можна пояснити частково деколювальною (промивкою) захисного фільтра при подачі води із дренажної системи в ґрунт.

## Modeling, control and information technologies – 2024

- [1] Дмитриев А.Ф., Хлапук Н.Н., Дмитриев Д.А. Деформационные процессы в несвязных грунтах в придренированной зоне и их влияние на работу осушительно-увлажнительных систем: Монография. Ровно: РГТУ, 2002, 145с.
- [2] Маслов Б.С., Станкевич В.С., Черненко В.Я. Осушительно-увлажнительные системы. М.: Колос, 1981, 280
- [3] Маслов Б.С., Минаев И.В., Губер К.В.: Справочник по мелиорации. М.: Росагропромиздат, 1989, 280 с.
- [4] Науменко І.І., Луценко В.В., Токар Л.О. Мінливість водоприймальної здатності дренажів з муфтами, Вісник Рівненського державного технічного університету. Збірник наукових праць, вип.2, частина 1. Рівне, 1999, с. 177 – 181.
- [5] Грицан С.В. Дослідження технічного стану гончарного дренажу на піщаних грунтах Західного Полісся. / Автореф. дис. канд. тех. наук. Ровно: УИИВХ, 1992, 24 с.
- [6] Пивовар Н.Г., Бугай Н.Г., Рычко В.А. Дренаж с волокнистыми фильтрами. Киев: Наук. думка 1980, 216 с.
- [7] Науково-методичні рекомендації щодо створення та функціонування дренажних систем у змінних сучасних умовах / за заг. Редакцією Сташука В.А., Рокочинського А.М., Волка П.П. Рівне, 2021, 113 с.
- [8] 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. С. 452-467.



# *Гідроінформатика як акселератор прийняття рішень в управлінні ремедіацією водних ресурсів: інноваційна агентно-орієнтована модель для Херсонщини*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.010>

Богдан Чернявський  
Кафедра технічних наук  
Університет Прикладних наук в Коніні  
Конін, Польща  
bohdan.cherniavskiy@konin.edu.pl

**Анотація** – У статті розкрито інноваційні підходи до управління ремедіацією водних ресурсів Херсонської області після підриву греблі Каховської ГЕС з використанням агентно-орієнтованої моделі. Автор акцентує увагу на актуальних та значущих проблемах відновлення водопостачання, підтримки екосистем, а також забезпечення відновлення соціально-економічного розвитку регіону. З метою вирішення цих питань запропоновано інноваційну агентно-орієнтовану модель, яка інтегрує сучасні інформаційні технології, такі як геоінформаційні системи. Модель спрямована на підвищення ефективності прийняття управлінських рішень, оптимізацію використання ресурсів та прискорення процесу ремедіації водних ресурсів Херсонщини.

**Ключові слова** – агентно-орієнтована модель, військові забруднення, ремедіація, водні ресурси, екологічна безпека

## I. INTRODUCTION

Безпрецедентна війна в Україні завдала шкоди усім без винятку сферам територіальної соціально-економічної системи країни. Руйнування і збитки, зафіксовані на сьогоднішній день, свідчать про масштабність і полівекторність руйнівного її впливу.

Згідно з опублікованими даними Світовим банком, загальна сума збитків та вартість відновлення країни на кінець 2023 року становила біля \$486 мільярдів, і ця сума продовжує зростати, додаючи до неї близько \$10 мільярдів щомісяця. Значні руйнування було зафіксовано в житловому секторі, у соціальній інфраструктурі, в тому числі, у сфері охорони здоров'я, освіти, а також у сільському господарстві. Було пошкоджено близько 149,300 житлових будинків і майже 20% сільськогосподарських угідь виявилися непридатними для подальшого використання. Близько 30% території країни забруднені мінами та боєприпасами, які не розірвалися, що створює додаткові труднощі для відновлення національної економіки [2].

Крім того, за прогнозами дослідників, до 2026 року Україна може втратити ще до \$120 мільярдів у продуктивності, а капітальні втрати можуть перевищити \$950 мільярдів. Такий рівень руйнувань не спостерігався в Європі з часів Другої світової війни, і відновлення країни може зайняти десятиліття [2, 3].

Необхідно зазначити, говорячи про збитки, йдеться не тільки про негативний антропогенний вплив на екосистему внаслідок воєнних дій, а й про такі явища, які зафіксовані світовою громадськістю, як екоцид (підриг дамби Каховської ГЕС), геноцид (масове знищення цивільного населення у Бучі, Ірпені та Ізюмі), а також урбцид (знищення міст, якот Маріуполь і Бахмут). Усі вище перелічені факти підкреслюють необхідність уже зараз виступити з ініціативою формування комплексної стратегії ремедіації постраждалих територій [4].

Питання ремедіації водних ресурсів та водозабезпечення постраждалих від війни територій є пріоритетними. Саме тому, фокус уваги світової спільноти прикутий до віднайдіння способів покращення ситуації.

Підриг дамби Каховської ГЕС спричинив масштабну екологічну катастрофу на території Херсонщини, що негативно вплинуло на водні ресурси регіону, знищивши водопостачальні зрошувальні системи, погіршивши якість води, та призвівши до забруднення й засолення ґрунтів. Відновлення водних ресурсів є життєво необхідним для регіону, оскільки це впливає не тільки на екологічний стан, але й на відновлення сільського господарства, питне водопостачання. У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні сучасних інноваційних технологій для ефективного управління відновлення водозабезпечення регіону та моніторингу функціонування водних систем, що дозволить прискорити процес ремедіації у цілому. Гідроінформатика та агентно-орієнтоване моделювання надають унікальні можливості для створення ефективної системи управління ремедіації водних ресурсів, враховуючи комплексність

досліджуваної проблеми і необхідність адаптації до швидко змінних умов.

Метою дослідження є розробка інноваційної агентно-орієнтованої моделі управління ремедіацією водних ресурсів Херсонщини з використанням гідроінформатики як акселератора прийняття управлінських рішень. Модель передбачає інтеграцію сучасних інформаційних технологій для моніторингу, оцінки та управління водопостачанням та функціонування водних систем, а також врахування взаємодії між різними агентами, які будуть брати участь у процесі ремедіації.

### II. АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ (АОМ) ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТРУМЕНТ РЕМЕДІАЦІЇ

#### A. Доцільність використання АОМ в проблемах, пов'язаних з управлінням водними ресурсами

Гідроінформатика — це міждисциплінарна галузь, яка поєднує інформатику, гідрологію, інженерну справу та екологію для вирішення проблем, пов'язаних з управлінням водними ресурсами. Вона використовує сучасні інформаційні технології для збору, обробки, аналізу та моделювання даних, що стосуються водних систем і процесів. Окрім геоінформаційних систем (ГІС), інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (ШІ) тощо, особливе місце в ній посідає моделювання водних процесів — розробка моделей для прогнозування потоків, водопостачання, затоплень, ерозії ґрунтів, якості води та інших процесів.

В якості інструменту досягнення поставленої мети автор пропонує до використання агентно-орієнтованого моделювання.

Агент-орієнтоване моделювання (АОМ) - це науковий підхід, що реалізує функції діяльності об'єктів на мікрорівні (на прикладі локальної територіальної системи - *прим. авт.*) шляхом моделювання функціонування складної динамічної системи на основі агентів, що мають певну індивідуальність, спрямовану на вивчення взаємодії об'єктів даної системи з метою встановлення залежностей між мікро- і макрорівнями. До однієї з основних переваг агент-орієнтованого підходу належить можливість моделювання системи, максимально наближеної до реальності. Більш деталізований параметричний аналіз АОМ в контексті його застосування у ремедіації водних ресурсів буде подано нижче [5].

#### B. Ключові аспекти та переваги АОМ

Агентно-орієнтоване моделювання (АОМ) є одним із перспективних інноваційним підходом в аналізі та управлінні складними системами, такими як водні ресурси, через те, що воно дозволяє моделювати взаємодію окремих агентів: населення, суб'єктів господарювання (в тому числі, у сільському господарстві як головного споживача водних ресурсів – *прим. авт.*), державних інституцій, органів місцевого самоврядування у динамічному середовищі.

Переваги застосування АОМ полягає в таких аспектах:

1. Моделювання індивідуальних агентів створює максимально подібну до реального життя симуляцію: кожен агент має власну мету, стратегію та поведінку, що дозволяє точно відображати реальні системи, включаючи економічні та екологічні фактори.

2. Адаптивність АОМ: моделі можуть динамічно адаптуватися до швидких змін у внутрішньому та зовнішньому середовищі, наприклад, кліматичні зміни або непередбачувані ситуації (аварії на об'єктах водної інфраструктури, забруднення води тощо).

3. Інтерактивність АОМ, яка полягає у тому, що агенти можуть взаємодіяти між собою та з навколишнім середовищем, що дозволяє розглядати різні сценарії розвитку подій, наприклад, ефекти від впровадження «зелених» методів ремедіації у водному господарстві (наприклад, біофільтрація – *прим. авт.*).

4. Прогнозування: агентно-орієнтовані моделі дозволяють аналізувати ретроспективні данні наслідків і формувати прогноз розвитку ситуації або пропонувати оптимальні стратегії управління тощо.

5. Інтеграція з іншими системами: АОМ досить ефективно інтегрується з іншими системами, зокрема, з геоінформаційними системами, з технологіями дистанційного зондування, а також може розширювати за рахунок цього свої функціональні можливості і генерувати інформацію у режимі реального часу в цілях прийняття ефективних оперативних, тактичних та стратегічних управлінських рішень [6, 7].

### III. МОДЕЛЬ АОМ РЕМЕДІАЦІЇ ВОДНИХ РЕСУРСІВ ПІСЛЯ ПІДРИВУ ДАМБИ КАХОВСЬКОЇ ГЕС.

#### ІДЕНТИФІКАЦІЯ КЛЮЧОВИХ АГЕНТІВ ВЕРИФІКАЦІЯ ЇХНІХ РОЛЕЙ

Перш за все, було виокремлено 6 основних груп зацікавлених сторін агентно-орієнтованої моделі, які прямо або опосередковано впливатимуть на систему прийняття рішень:

- суб'єкти аграрного бізнесу - основні споживачі води для цілей зрошення сільськогосподарських угідь та ведення основної операційної діяльності. Фермери відіграють ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки та стійкості сільського господарства. Їхні потреби у воді впливають на загальний розподіл водних ресурсів;

- комунальні служби, метою їх діяльності є забезпечення населення чистою питною водою та підтримання інфраструктури водопостачання та водовідведення Комунальні служби, в тому числі, опосередковано несуть відповідальність за здоров'я та добробут населення, забезпечуючи доступ до безпечної питної води та санітарних умов;

- державні органи управління, які здійснюють регулювання та координацію процесів



ремедіації та розподілу водних ресурсів. Передусім, державні органи встановлюють нормативні акти, забезпечують фінансування та контроль за виконанням програм (в тому числі, ремедіації – прим. авт.), а також вирішують конфлікти між різними користувачами води;

- органи місцевого самоврядування, які організують координацію та реалізацію програм ремедіації на рівні місцевих громад. Органи місцевого самоврядування, разом з цим, забезпечують безпосередню взаємодію з місцевим населенням, враховують місцеві потреби та проблеми, а також сприяють участі громадськості в процесах ремедіації;

- Іноземні партнери та інвестори, які організують та реалізують фінансування і впровадження передових технологій в цілях ремедіації та управління водними ресурсами. Відомо, що іноземні інвестори привносять в національну економіку не тільки капітал, але і новітні технології, досвід, підвищення кваліфікації та професіоналізму, що дає змогу прискорити та поліпшити процеси ремедіації, впровадити прогресивні методи та обладнання в управління водними ресурсами;

- фірми з державно-приватного партнерства (ДПП) і підрядники ремедіаційних робіт. Вони можуть суттєво вплинути на хід реалізації ремедіації та ефективного розподілу води на основі укладання договорів із державою.

#### A. Опис виділених груп агентів

Кожного агента  $i$  у системі можна описати такими характеристиками:

- стан агента  $Si(t)$  у момент часу  $t$ ;
- набір правил поведінки  $Ri$ ;
- місце розташування агента в середовищі  $Pi(t)$ .

#### B. Модель імплементації в середовище обраних груп агентів:

- Середовище імплементації гравців являє собою двовимірний або тривимірний простір, у якому виділені групи агентів можуть переміщатися і взаємодіяти. 2d або 3d простір може бути розділений на ділянки, кожна з яких має свої параметри і характеристики  $Ej(t)$ , наприклад, рівень забруднення ресурсів.
- *Взаємодія відібраних груп агентів:* взаємодію між ключовими агентами проекту можна описати функцією  $Iij(t)$ , яка залежить від їхнього місця розташування і поведінки в певний момент часу:

$$Iij(t) = f(Si(t), Sj(t), Pi(t), Pj(t)) \quad (1)$$

- *Изменение поведения в процессе выбора агентом управленческого решения:* стан поведінки агентів змінюється в часі відповідно до правил поведінки та різного роду взаємодії з іншими агентами, які беруть

участь у реалізації ремедіаційного проекту території:

$$Si(t+1) = g(Si(t), \sum j Iij(t), Ej(t)) \quad (2)$$

Інтеграція різних гравців в агентно-орієнтовану модель ремедіації водних ресурсів забезпечує комплексний підхід до управління та розподілу води. Кожен гравець робить свій внесок у процес, що дає змогу враховувати різноманітні інтереси та досягати більш ефективних рішень.

#### C. Моделювання процесу ремедіації

Правила поведінки різних груп виділених агентів на основі розроблених та імplementованих алгоритмів поведінки для кожного типу агентів дають змогу максимально оптимізувати процес управління та координації процесом відновлення території. Наприклад, агенти, які безпосередньо реалізують ремедіаційні операції очищення водних ресурсів, можуть слідувати певним алгоритмам взаємодії з іншими групами агентів, відповідно до маршрутів і місць локалізації первинної або екстреної ремедіації забруднених ділянок. Агенти-населення в той же самий час реагують на описані вище заходи і приймають, у свою чергу, свої рішення.

#### D. Аналіз та оцінка результатів

Оцінювання результатів імплементації проекту агентно-орієнтованого моделювання ремедіації водних ресурсів Херсонської області може бути здійснено в розрізі сукупності параметрів і показників, що включають показники оцінювання ефективності управління процесом ремедіації, ефективністю взаємодії між учасниками цього процесу, а також ефективність використання всіх видів ресурсів, таких як фінансові, матеріально-технічні, трудові тощо, у співвідношенні часу та ступеня виконання поставлених завдань.

#### E. Оптимізація

Проведення серії симуляцій на початкових етапах імплементації проекту дасть змогу виявити додаткові можливості підвищення ефективності пропонуваного до впровадження проекту. Йдеться про виявлення найперспективніших варіантів інтеграції з передовими технологіями та розробками, такими як дрони, роботизована техніка, ГІС тощо. Це дасть змогу підвищити загальну ефективність управління у рамках оптимізації стратегій ремедіації, моніторингу ситуації з метою ефективного оперативного і тактичного управління процесом як самої ремедіації, так і соціального реагування; визначення найефективніших маршрутів транспортної логістики та вибору раціональних методів ремедіації тощо.

На переконання автора, сучасні технологічні досягнення дають змогу значно розширити можливості агентного моделювання в контексті ремедіації територій. Роботизація, штучний інтелект, ГІС, дрони, безпілотні транспортні засоби, технології розпізнавання та 3D-моделювання

## Modeling, control and information technologies – 2024

зроблять пропонування для імплементації проєкт більш точним, адаптивним та ефективним.

Загалом, інтеграція описаних технологій вибірково і комплексно дадуть змогу досягти в умовах дефіциту часу і дефіциту ресурсів максимально можливих результатів.

### IV. ВИСНОВКИ

Імплементація проєкту розгортання ремедіаційних робіт з ремедіації та відновлення водних ресурсів Херсонської області є життєво необхідним для відновлення регіону після руйнування греблі Каховської ГЕС. Сучасні умови вимагають, своєю чергою, застосування сучасних підходів до ліквідації проблем екологічного, економічного та соціального характеру. У дослідженні пропонується інноваційний підхід управління ремедіацією забрудненої території з використанням агентно-орієнтованої моделі. Реалізація цього проєкту сприятиме:

- відновленню екологічного балансу і зниженню забруднення території, насамперед - водних ресурсів;

- забезпеченню населення чистою питною водою та відновленню розвитку аграрного сектору національної економіки, який є ключовим драйвером розвитку країни загалом, зокрема Південного регіону України;

- модернізації інфраструктури відповідно до міжнародних стандартів та залучення інвестицій для досягнення цілей сталого економічного розвитку, що дасть змогу підвищити конкурентні позиції України;

- впровадженню передових технологій у пов'язані з водозабезпеченням сфери та галузі соціально-економічної системи, що нададуть їй гнучкість і адаптивність в умовах постійних змін.

Цей проєкт дасть змогу розв'язати не тільки критичні завдання відновлення, а й зможе закласти фундамент для розвитку країни в майбутньому, сприяючи підвищенню її резистентності до криз.

### REFERENCES

- [1] Federle, J., & Schularick, M. (2024). The Price of War: Economic Fallout from the Conflict in Ukraine. Kiel Institute. URL: <https://www.ifw-kiel.de>
- [2] World Bank. (2024). Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released. URL: <https://www.worldbank.org>
- [3] United Nations Economic Commission for Europe. (2023). UNECE convenes inter-agency group to coordinate assessment of environmental damage in Ukraine. UNECE. URL: <https://unece.org>
- [4] Hryhorczuk, Daniel & Levy, Barry & Prodanchuk, Mykola & Kravchuk, Oleksandr & Bubalo, Nataliia & Hryhorczuk, Alex & Erickson, Timothy. (2024). The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 19. DOI:10.1186/s12995-023-00398-y
- [5] Adeyemo, Oluwatoyin & Abos, Pro. (2024). Fundamentals of Agent-Based Modeling: Emergence and complex adaptive systems.
- [6] Eilers, Jacintha & Hoogendoorn, Mark & Wendt, David. (2010). An Agent-Based Modeling Approach to Investigate Emergent Patterns in Ecological Systems. *Proceedings - 2010 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, IAT 2010*. 2. 6 - 13.
- [7] Radosavljevic, Sonja & Sanga, Udit & Schlüter, Maja. (2024). Navigating simplicity and complexity of social-ecological systems through a dialog between dynamical systems and agent-based models.

# Обґрунтування вибору конструкції водозабірної споруди в складі протипаводкового комплексу на основі фізичного моделювання

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.011>

Любомир Шинкарук  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
м. Рівне, Україна  
[l.a.shunkaruk@nuwm.edu.ua](mailto:l.a.shunkaruk@nuwm.edu.ua)

Микола Хлапук  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
м. Рівне, Україна  
[m.m.khlapuk@nuwm.edu.ua](mailto:m.m.khlapuk@nuwm.edu.ua)

Любов Волк  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
м. Рівне, Україна  
[l.r.volk@nuwm.edu.ua](mailto:l.r.volk@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – Запропоновано і розглянуто новий тип автоматичної водозабірної споруди, яку досліджено на гідравлічній моделі та отримано патент на корисну модель. Споруду планують впроваджувати в складі протипаводкових ємкостей або на польдерних системах. Застосовано ідею регулювання ширини русла та гідравлічних параметрів потоку з метою гарантованого відбору та накопичення частини паводкової витрати з міждамбового простору під час проходження паводка.

**Ключові слова** — паводок, протипаводковий захист, регуляційні споруди, огорожувальні дамби, протипаводкові ємкості, гідравлічне (фізичне) моделювання.

РОЗДІЛ 1. Зміни клімату на Землі та їх наслідки.

Спочатку ХХІ століття внаслідок затоплення високими водами постраждало понад 3 млн людей на території, підпорядкованій Європейській економічній комісії Організації Об'єднаних Націй (ЄЕК ООН), включаючи 1,9 млн осіб тільки у Східній Європі. В останні роки почастишали катастрофічні паводки, збільшились їх негативні економічні, соціальні та екологічні наслідки й зросла кількість визваних ними людських жертв. Оцінюючи серйозність такої ситуації й взявши до уваги розширення територій, які відчувають на собі зміни клімату, можна передбачити, що такі очікувані кліматичні зміни призведуть до того, що затоплення стануть частішими і масштабнішими.

Слід зазначити, що, зазвичай, паводки провокують і спричиняють інші катаклізми, такі як – зсуви, селі, буревії, забруднення та зараження джерел водопостачання та інші. Тому збитки від затоплень високими водами займають друге місце після збитків від землетрусів.

Спеціалісти вказують на особливість проходження сучасних паводків констатуючи той факт, що норма опадів на територіях, які зазнають затоплення, залишається такою ж як і раніше, але інтенсивність їх випадання в часі значно при-скорилась, і до тих пір, доки не буде здійснена надійна система захисних заходів в річковому басейні, адаптована до теперішніх кліматичних змін, затоплення завжди будуть можливими [1; 2]. Результати наслідків паводків, засвідчують, що необхідно мати чітку схему їх пропуску та бути впевненими у надійній роботі всіх гідротехнічних споруд, особливо під час такого раптового та швидкоплинного гідрологічного процесу як паводок.

РОЗДІЛ 2. Сучасна концепція протипаводкового захисту.

Світовий досвід здійснення протипаводкового захисту на передгірських ділянках річок показує, що в умовах теперішніх глобальних змін клімату здійснювати захист традиційним методом за допомогою огорожувальних дамб, виявляється недостатнім і ненадійним. Тому більшого визнання набуває концепція, згідно з якою традиційні засоби протипаводкового захисту слід використовувати в одночасному поєднанні з регулюванням паводкового стоку (здійснювати управління паводковими витратами), яке є одним з самих радикальних способів боротьби з паводками і повеннями. Таке управління паводковим стоком можна здійснювати за допомогою протипаводкових акумулювальних ємкостей

Протипаводкові ємкості в нормальних умовах це порожні ємкості (накопичувачі води), які заповнюються тільки під час паводків рідкої повторюваності а спрацювання заакумульованого

об'єму води здійснюють після проходження паводка. Основною гідротехнічною спорудою в протипаводковому комплексі є водозабірна споруда, яка за принципом роботи може бути автоматична (без затворів) або регульована (із затворами). Результати модельного дослідження водозаборів в гідротехнічній лабораторії НУВГП на річках Бистриці, Тисі, Дністрі та натурний досвід роботи таких водозаборів показує, що поріг для автоматичних водозабірних споруд необхідно влаштувати на позначках що не перевищують позначок, які відповідають паводковій витраті в річці з забезпеченістю не більше 10%. При цьому буде забезпечуватись автоматичний забір (перелив) води під час паводка з міждамбового простору на акваторію ємкості.

### РОЗДІЛ 3. Особливості роботи протипаводкових ємкостей.

Після проходження паводка в Прикарпатті у 2008 р. спеціалісти знову звернулися до схем захисту з влаштуванням протипаводкових ємкостей, яку розпочинали впроваджували вже двічі, у XIX і XX ст. На сьогодні, в період глобальних кліматичних змін, цей варіант є найперспективнішим і найреальнішим з точки зору забезпечення захисних функцій від шкідливої дії води, оскільки досвід роботи попередніх захисних схем підтверджує необхідність одночасного використання в захисній схемі класичних (систематичних) гідротехнічних регуляційних споруд, у тому числі протипаводкових акумулювальних ємкостей.

Такі ємкості дозволяють значно понизити рівень води в річці на нижче розташованих ділянках під час проходження паводкових витрат з високою забезпеченістю завдяки розвантаженню частини паводкової витрати і її акумуляції на акваторії ємкості, що суттєво зменшує небезпеку затоплення прилеглих земель та населених пунктів й руйнування берегів водотоку та регуляційних споруд. Для цього можна використовувати існуючі польдери або будувати нові спеціальні ємкості для акумуляції частини паводкової витрати.

Особливості роботи протипаводкових ємкостей пов'язані з відводом значних витрат води з річки при невеликих питомих витратах на водозлив водозабірної споруди. Зазвичай, боковий відвід води з річки істотно ускладнює умови роботи водозабору. Об'єми штучних ємкостей повинні бути достатніми для акумуляції розрахункових об'ємів води, а водозабірні споруди повинні гарантувати наповнення ємкостей за розрахунковий період часу.

Таким чином, концепція управління паводками полягає в тому, що до складу схеми протипаводкового комплексу повинні обов'язково входити протипаводкові ємкості та класичні (традиційні) регуляційні споруди – огорожувальні дамби, напівзагати, загати, донні пороги, поздовжнє укріплення тощо.

В Закарпатській області в басейні р. Тиса заплановано створити 22 протипаводкові ємкості з загальною площею 152 кв. км і сумарною корисною ємністю 92 млн м<sup>3</sup> [3]. Будівництво однієї із них «Вари-Четфалва» було передбачено на р. Тиса в Берегівському районі.

На річках Прикарпаття передбачено влаштувати 101 ємкість [3]. Тут було розпочато будівництво трьох ємкостей у верхів'ї Дністра. Натепер введено в експлуатацію три протипаводкові ємкості у верхів'ї Дністра у Львівській області: «Чайковичі», «Мости» і «Тершаків», що при різких підняттях рівнів дозволяє накопичити близько 100 млн м<sup>3</sup> паводкового стоку та покращити умови проходження паводкових витрат на р. Дністер нижче за течією у Львівській та Івано-Франківській областях.

### РОЗДІЛ 4. Конструкція бокового водозабору.

Конструкція бокового водозливу визначилась за результатами виконаних гідравлічних розрахунків з врахуванням швидкості протікання через нього води а також гідравлічного (фізичного) моделювання водозабірних споруд протипаводкового комплексу. Нами було запропоновано і розроблено новий варіант водозабору, який крім будівництва основного бокового водозабору передбачає влаштування спеціальної струмененапрямної дамби, яка розташовується на правобережній заплаві, навпроти бокового водозабору (рис. 1).

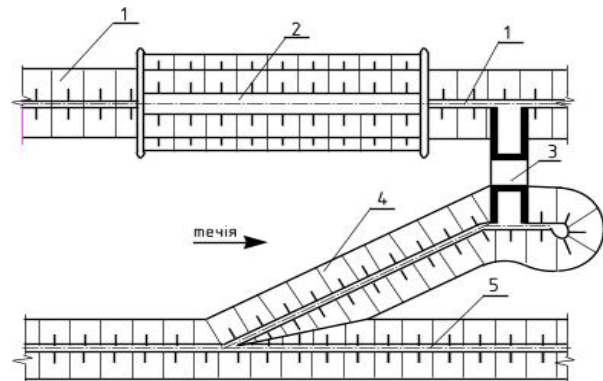


Рисунок 1. Водозабірний вузол протипаводкового комплексу (варіант 1): 1 – лівобережна огорожувальна дамба, 2 – боковий водозабір; 3 – русловий водозлив; 4 – струмененапрямна дамба; 5 – правобережна огорожувальна дамба

Струмененапрямна дамба в даному випадку призначена забезпечувати постійні по довжині швидкості річкового потоку і постійні глибини води на всій довжині бокового водозабору для створення і підтримання на гребені бокового водозливу постійного напору і постійних питомих витрат. Струмененапрямна дамба влаштується на правосторонній заплаві р. Бистриця на ширині бокового водозливу з продовженням її нижче кінця бокового водозливу на 15,0 м до місця влаштування руслового водозливу і з плавним окресленням її в плані на зразок шпоровидної дамби на деякій відстані за

руслевим водозливом. Дамба насипається із ґрунту-суглинку; в поперечному перерізі має форму трапеції з коефіцієнтом закладання руслового і заплавної укосу 1:2,5; ширина гребеня дамби – 3,5 м. Для захисту руслового укосу дамби і основи використовується габйонне і кам'яне і кріплення. Русловий водозлив влаштовується для підтримання постійного напору на гребені бокового водозабору при витраті водозабору  $Q_{б.в.} = 271 \text{ м}^3/\text{с}$  і транзитної витрати  $Q_{тр.} = 246 \text{ м}^3/\text{с}$ . Розрахунками встановлена довжина водозабору – 10,9 м, ширина – 7,5 м з перспективою влаштування малого мосту з проїжджою частиною п'ятої категорії. Місцезнаходження руслового водозливу визначалось в результаті гідравлічних розрахунків і було встановлено, що довжина передньої ділянки між кінцем бокового водозливу і початком руслового складає 15,0 м.

Вихідна ділянка русла за місцем розташування руслового водозливу визначалась у результаті гідравлічних розрахунків, з тим, щоб не допустити значних розмивів русла річки та дамби і склала 22,0 м.

В основу обґрунтування запропонованого варіанту водозабору протипаводкового комплексу було покладено положення Маккавєєва В.М. [4], про те якщо на ділянці бокового водозливу при розрахунковій максимальній витраті забезпечити постійну швидкість річкового потоку і постійну глибину потоку, то напір на порозі бокового водозабору і питомі витрати будуть залишатись постійними і незмінними по його довжині. Це дозволить виконати розрахунки пропускної здатності водозливу і його нижнього б'єфу більш обґрунтованими.

Недоліком запропонованої конструкції водозабірної споруди протипаводкового комплексу [5] є те, що струмененапрямна дамба, що входить до складу водозабірної споруди, виконана прямолінійною, і не забезпечує необхідної ефективності щодо забору (переливання) необхідної частини паводкової витрати через водозлив в акумулювальну ємкість, тобто, практично не забезпечує розрахункові напори на гребені водозабору по його довжині і забір розрахункової витрати. З іншого боку, русловий укіс струмененапрявної дамби зазнає значного гідродинамічного тиску води під час проходження паводків або повеней. Таким чином дамба часто зазнає деформацій і руйнувань внаслідок шкідливої дії високої води.

У зв'язку з вищеописаною ситуацією нами було запропоновано конструктивне рішення, направлене на вдосконалення конструкції струмененапрявної дамби. Суть рішення полягала в тому що планове окреслення дамби запропоновано виконати криволінійним (у вигляді четверті еліпса, рис. 2), що покращує гідравлічну картину протікання паводкової витрати вздовж бокового водозабору та забір розрахункової витрати води в ємкість, а також більш безпечно роботу дамби і водозабору [6].

Робота гідровузла пов'язана з відводом значної частини паводкових/повеневих витрат води з річки при невеликих питомих витратах води на водозлив водозабірної споруди. Під час підйому води в річці вона накопичується в руслі і на заплавах і продовжує рухатись в міждамбовому просторі. Через деякий час рівень води досягає відмітки гребеня водозливу бокового водозабору (позиція 2, рис. 2).

З цього моменту вода починає переливатись через гребінь водозливу, попадає в гасник енергії (водобійний колодязь) і відводиться в акумулювальну ємкість, яка знаходиться за межами водозабірної споруди протипаводкового комплексу. Криволінійність конфігурації струмененапрявної дамби (позиція 4, рис. 2) змінює напрям потоку в бік водозливу бокового водозабору, при цьому забезпечується відведення більшого об'єму води в акумулювальну ємкість, що сприяє зменшенню транзитної паводкової витрати та пониженню рівнів води нижче розташування гідровузла. Конструкція водозабірної споруди протипаводкового комплексу дозволяє ефективніше забезпечувати пропускну спроможність водозабірної споруди, оптимізувати регулювання та розподіл паводкових вод, значно покращити гідравлічний режим на водозабірній споруді, вона є надійнішою і менш витратною під час експлуатації.

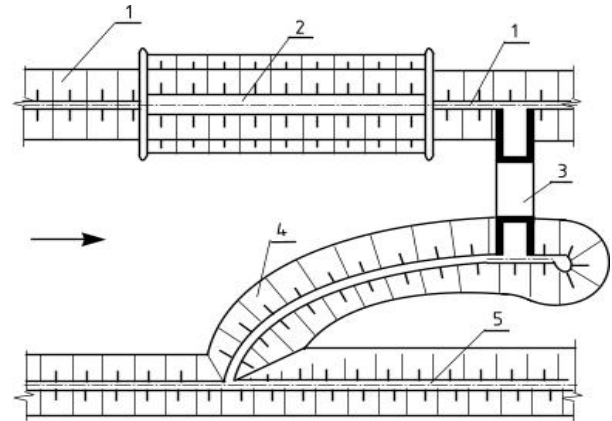


Рисунок 2. Водозабірний вузол протипаводкового комплексу (варіант 2) (позначення елементів аналогічні як і на рисунку 1 за винятком позиції: 4 –криволінійна струмененапрямна дамба)

## РОЗДІЛ 5. Моделювання водозаборів протипаводкової ємкості.

Для підтвердження та аргументації ефективної роботи запропонованих варіантів водозабірної споруди протипаводкового комплексу в гідротехнічній лабораторії кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки НУВГП було виконано фізичне моделювання та експериментальні дослідження таких споруд: на р. Бистриця (комплекс «Тершаків», рис. 3 і 4), на р. Тиса (комплекс «Вари-Четфалва», рис. 5 і 6) та натурне дослідження автоматичного водозабору на р. Дністер (комплекс «Чайковичі», рис. 7 і 8).



Побудова фізичної моделі русла річки і водозабірних споруд полягала у досягненні забезпечення подібності водного потоку на моделі і в натурі. Цю задачу вирішували одночасно як шляхом можливо-го форсування модельних витрат води, так і підбором шорсткості русла і заплав.

Метою досліджень та обробки отриманих експериментальних результатів було визначення значень основних параметрів, які впливають на водопропускну спроможність бокового водозливу (водозабору), а саме: відношення довжини водозливного фронту до ширини дна еквівалентного русла; напір на порозі водозливу; можливий напір на порозі водозливу за умови, що він не працює, а напір відповідає глибині еквівалентного русла при тій же витраті; величину відношення вищезазначених напорів; коефіцієнт витрати, який дозволяє врахувати вплив косоного підходу потоку до водозливного порогу.



Рисунок 3. Лабораторне калібрування моделі ділянки р. Бистриця в створі будівництва водозбору протиपाvodкової ємкості «Тершаків» у Львівській області



Рисунок 4. Дослідження водозбору протипаvodкової ємкості «Тершаків» на р. Бистриця у Львівській області



Рисунок 5. Модель бокового водозливу № 1 у вигляді потайного отвору на р. Тиса біля с. Вари в Закарпатській області (процес розмиву потайного отвору)



Рисунок 6. Модель бокового водозливу № 2 на р. Тиса біля с. Вари в Закарпатській області (моделювання проходження розрахункового паводка та заповнення ємкості)



Рисунок 7. Боковий водозбір реалізованої протипаvodкової ємкості «Чайковичі» на р. Дністер



Рисунок 8. Водобійний колодязь реалізованої ємкості «Чайковичі» на р. Дністер у Львівській області

## Modeling, control and information technologies – 2024

### Висновки

1. Захисний комплекс, який включає протипаводкові ємкості та традиційні регуляційні споруди може гарантувати надійний захист територій від затоплення. Ємкості слід влаштувати там, де паводок вважають найнебезпечнішим (наприклад у верхів'ї Дністра).

2. Оскільки робота таких комплексів є складною і непередбачуваною, то рекомендуємо виконувати для них обов'язкове моделювання. Фізичне (гідравлічне) моделювання протипаводкових гідротехнічних споруд дозволяє перевірити та підтвердити/не підтвердити прогнозні висновки щодо майбутньої роботи протипаводкових споруд і тим самим передбачити та гарантувати нормальну та надійну експлуатацію таких споруд.

3. Протипаводкові акумулювальні ємкості натепер також можуть бути використані в якості резервних басейнів для накопичення і зберігання прісної (питної) води, яку можна використовувати в засушливі періоди року.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Якушев А.І., Швартау В.Р., Шинкарук Л.А., Хлапук М.М. Протипаводковий захист на ділянці верхнього Дністра: історія, проблеми, шляхи їх вирішення // Водне господарство України. 2013. № 2 (104). С. 12–18.
- [2] Liubomyr A. Szynkaruk, Zdzisław Jan Małeckі. Koncepcja zarządzania powodziąmi występującymi w rzekach Ukrainiskich Karpat wraz z oceną zjawisk hydrometeorologicznych // ZESZYTY NAUKOWE – Inżynieria lądowa i wodna w kształtowaniu środowiska, Nr 10, 2014. KALISZ: 26–42.
- [3] Державна цільова програма комплексного протипаводкового захисту в басейнах річок Дністра, Пруту та Сірету // Постанова Кабінету Міністрів України № 1151 від 27 грудня 2008 року. 11 с.
- [4] Маккавеев В.М., Коновалов И.М. Гидравлика. Л.-М. : Речиздат, 1940. 632 с.
- [5] Кириєнко І.І., Шинкарук Л.А., Щодро О.Є. Новий тип водозабору в складі протипаводкового комплексу на річках Українських Карпат // Гідромеліорація і гідротехнічне будівництво. Зб. наук. праць. Випуск 31. Рівне : НУВГП. 2007. С. 139–145.
- [6] Патент на корисну модель № 148264. Україна. МПК (2021.01). E02B 3/02 (2006.01). E02B 7/00. Водозабірний вузол протипаводкового комплексу / Автори: Л.А. Шинкарук, М.М. Ткачук. Володільець НУВГП. № заявки u 2021 01124; заявлено 09.03.2021, опубліковано 21.07.2021. Бюлетень № 29. 4 с.



# Спосіб регулювання притоку рідини до напірного трубопроводу-збирача за наявності транзитної витрати

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.012>

Володимир Чернюк,  
Національний ун-т “Львівська політехніка”  
Львів, Україна  
v.cherniuk@ukr.net

Ірина Бігун,  
Львівське міське комунальне підприємство  
“Львівводоканал”,  
Львів, Україна

Василь Іванів,  
Національний ун-т “Львівська політехніка”  
Львів, Україна

Вадим Фасуляк,  
Національний ун-т “Львівська політехніка”  
Львів, Україна

Віталій Литвин,  
Національний ун-т “Львівська політехніка”  
Львів, Україна

**Анотація** – Виявлено, що за наявності транзитного потоку на вході у напірний трубопровід-збирач (ТЗ), останній на початковому своєму відрізку роздає, а не збирає рідину. Винайдено спосіб регулювання притоку рідини в ТЗ, за яким роздача рідини трансформується у її притік в ТЗ. Кінетичну енергію транзитного потоку, котрий входить у ТЗ, запропоновано використовувати для звуження та прискорення потоку рідини у створах входних насадок. Рекомендовано застосовувати локальні еластичні звужувальні вставки. Витік рідини з ТЗ припиняється та змінюється на її всмоктування в ТЗ. Це відбувається на кожній входній насадці, у створі котрої встановлено еластичну звужувальну вставку.

**Ключові слова** – напірний трубопровід-збирач, регулювання нерівномірності притоку рідини у дрена

## I. ВСТУП

Трубопроводи-збирачі (ТЗ), які працюють у напірному режимі, застосовуються у водопостачанні, водовідведенні, вентиляції, осушенні перезволожених земель, енергетиці, комп’ютерній техніці (мікротеплообмінники для охолодження комп’ютерів).

У теплообмінниках паралельними потоками напірні ТЗ працюють у комплексі з напірними розподільними трубопроводами (РТ) (рис. 1). Рідина із РТ тече паралельними трубами до ТЗ. Кількість паралельних труб у компактних теплообмінниках зазвичай перевищує 100 штук. Якщо геометричні параметри РТ і ТЗ вибрано неналежним чином, то з причини великої кількості паралельних труб виникають проблеми з розподілом потоку. У компактному теплообміннику Z-типу (рис. 1) може відбуватися зворотний потік. Тобто в деяких паралельних трубах теплоносій тече від ТЗ до РТ. Це негативно впливає на роботу теплообмінника [1].

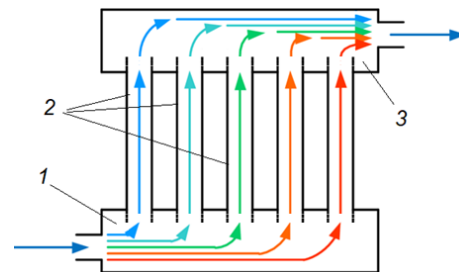


Рис. 1. Схема протікання паралельних ламінарних струменів рідини крізь теплообмінник Z-типу: 1 – розподільний трубопровід; 2 – з’єднувальні труби; 3 – трубопровід-збирач

Нами [2] експериментально досліджувалась робота напірного ТЗ, прокладеного у воді. В ТЗ на його вході вводили транзитний потік води. Виявлено, що на початковій частині ТЗ відбувалась роздача води із ТЗ назовні крізь входні насадки.

Протяжність відрізка роздачі рідини залежала від витрати транзитного потоку і сягала 40 % від загальної довжини ТЗ. На цьому початковому відрізку ТЗ працював у режимі розподільного трубопроводу (РТ). На решті довжини відбувався приплив води в ТЗ крізь його входні насадки [2].

Запобігання роздачі рідини з ТЗ є невирішеною проблемою їх проектування.

## II. МЕТА РОБОТИ

Мета досліджень - розробити методику запобігання роздачі рідини з напірного трубопроводу-збирача за наявності транзитного потоку на його вході.

## III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД

Застосовано експериментальний стенд з гравітаційною подачею води на досліджуваний трубопровід-збирач (рис. 2-рис. 5).

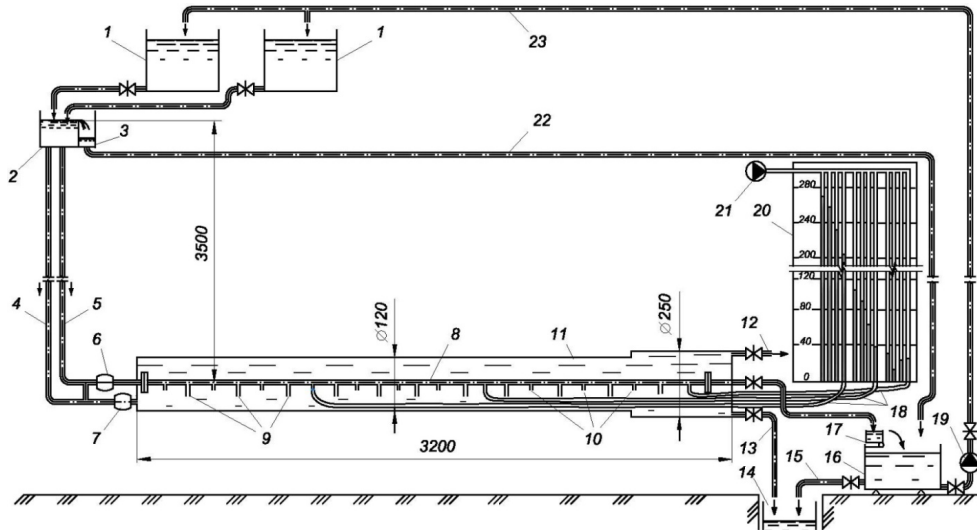


Рис. 2. Схема експериментального стенду: 1 - ємності для води; 2 - напірний бачок з переливною стінкою; 3 – скидний бачок; 4, 5 – подавальні труби; 6, 7 – витратоміри; 8 – досліджуваний ТЗ; 9 – вхідні насадки; 10 – штуцери для приєднання імпульсних ліній від п'єзометрів; 11 – прозорий футляр; 12 – випуск повітря; 13 – скид води; 14 – водозбірний лоток; 15 – скидна труба; 16 – приймальний бак; 17 – мірний бачок; 18 – імпульсні лінії; 19 – помпа; 20 – щит з п'єзометрами; 21 – компресор; 22 – скидна труба; 23 – напірний трубопровід (імпульсні лінії від штуцерів 1-3, 5-7 і 9-11 умовно не показано)

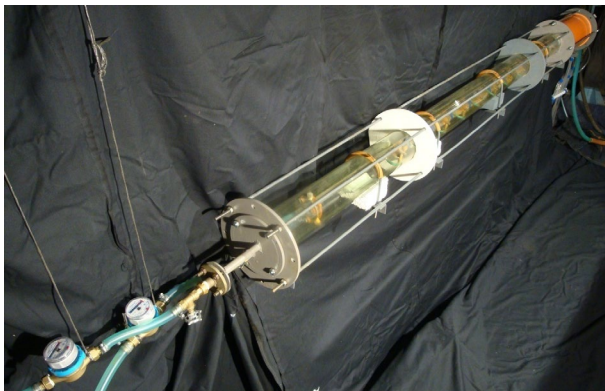


Рис. 3. Загальний вигляд експериментального трубопроводу-збирача, поміщеного в прозорий напірний футляр: а - вид на вхідну частину з витратомірами; б – те саме, вихідну з імпульсними лініями до п'єзометрів

Для забезпечення регулювання робочого напору на вхідних насадках ТЗ та з метою створення зовнішнього потоку, котрий омиває ТЗ зовні, досліджуваний ТЗ поміщено в герметичний напірний футляр (рис. 2-рис. 4).

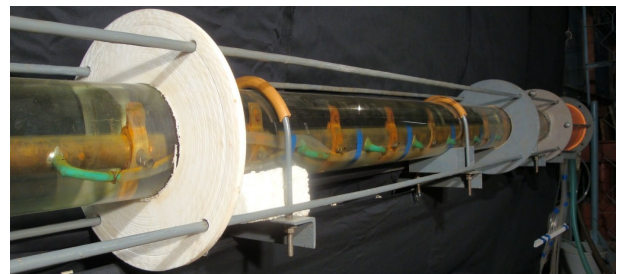


Рис. 4. Ділянка прозорого футляра з вмонтованим ТЗ (внутрішній діаметр ТЗ  $D = 22$  мм, те саме, вхідних насадок  $d = 8$  мм)

Футляр (рис. 4) має оптично прозору ділянку з внутрішнім діаметром 108 і довжиною 2548 мм. Прозорість стінок футляра забезпечує візуальний контроль за станом і роботою ТЗ.

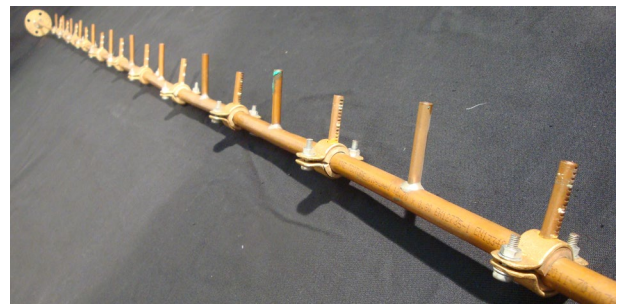


Рис. 5. Експериментальний трубопровід-збирач (внутрішній діаметр ТЗ  $D = 10$  мм, те саме, вхідних насадок  $d = 4$  мм)

У цій статті представлено результати для трубопроводу-збирача з внутрішнім діаметром  $D = 20,18$  мм і вхідними циліндричними насадками з внутрішніми діаметрами  $d = 8,02$  мм.

Досліджувані латунні ТЗ оснащені штуцерами для приєднання імпульсних ліній від п'єзометрів. Штуцери прикріплено до ТЗ зварними швами. Посередині проміжків між штуцерами в стінці ТЗ вмонтовано вхідні циліндричні насадки.

Кількість штуцерів для приєднання імпульсних ліній від п'єзометрів рівна 12, а число входних циліндричних насадок - 11 штук. Входні циліндричні насадки з бічним виходом струменя закріплено в стінці ТЗ з можливістю обертання навколо своїх поздовжніх осей на  $0^{\circ} - 360^{\circ}$ . Цим регулювали значення кута між напрямками руху потоку в ТЗ і струменя, що приєднувався до нього.

На входній торцевій кришці футляра закріплено патрубку для подачі води всередину футляра та для уведення транзитного потоку в ТЗ (рис. 3,а). Імпульсні трубки 18, які з'єднують штуцери 10 із п'єзометрами 20, виведено назовні футляра 11 крізь його задню торцеву кришку (рис 2, рис. 3,б).

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

При уведенні транзитного потоку води в ТЗ у його початковій частині утворюється повний напір, який перевищує статичний напір води в футлярі, тобто зовні ТЗ. У цьому випадку входна частина експериментального трубопроводу-збирача працює в режимі розподільного трубопроводу і роздає воду (рис. 6). На решті довжини ТЗ напір у ньому менший, ніж у футлярі. Тому середній і кінцевий відрізки ТЗ працюють в режимі трубопроводу-збирача.

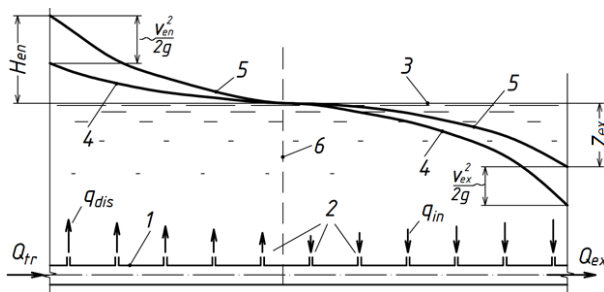


Рис. 6. Схема роботи напірного ТЗ, за наявності транзитного потоку рідини на вході: 1 – стінка ТЗ; 2 – входні насадки; 3 – рівень рідини зовні ТЗ; 4 – лінія п'єзометричного напору для потоку в ТЗ; 5 – те саме, лінія повного напору; 6 – межа ділянок роздачі та збирання рідини;  $H_{en}$  – робочий напір на вході у ТЗ;  $Z_{ex}$  – те саме, на виході;  $Q_{tr}$  – транзитна витрата рідини;  $Q_{ex}$  – витрата рідини на виході з ТЗ;  $q_{distr}$  – витрата рідини крізь одну насадку на ділянці її роздачі;  $q_{in}$  – те саме, на ділянці збирання рідини;  $v_{en}^2/2g$  – швидкісний напір транзитного потоку на вході у ТЗ;  $v_{ex}^2/2g$  – швидкісний напір потоку на виході з ТЗ [3]

Розподіл робочих напорів  $H$  та  $Z$  уздовж ТЗ графічно зображено на рис. 7,а,б, витрат струменів води крізь насадки  $q$ , котрі витікають з ТЗ та вливаються в ТЗ – на рис. 7,в,г та витрат води  $Q$  всередині ТЗ – на рис. 7,д,е. Верхні частини а, в, д рис. 7 представляють відрізок ТЗ, на якому струмені води входять в ТЗ, нижні б, г, е – репрезентують відрізок роздачі води з ТЗ, на якому ТЗ працює у режимі розподільного трубопроводу. Тому для відрізка роздачі води величини  $H$  і  $q$  та  $Q$  подано зі знаками мінус.

З рис. 7, бачимо, що при вищій витраті транзитного потоку  $Q_{tr}$  більша кількість насадок здійснює роздачу води з ТЗ. Пояснити це можна так. Транзитний потік за рахунок своєї швидкості має визначальну кінетичну енергію, а повний напір потоку  $H_{PT}$  в ТЗ на відрізку роздачі води є вищим, ніж напір  $H_{out}$ , що діє зовні ТЗ.

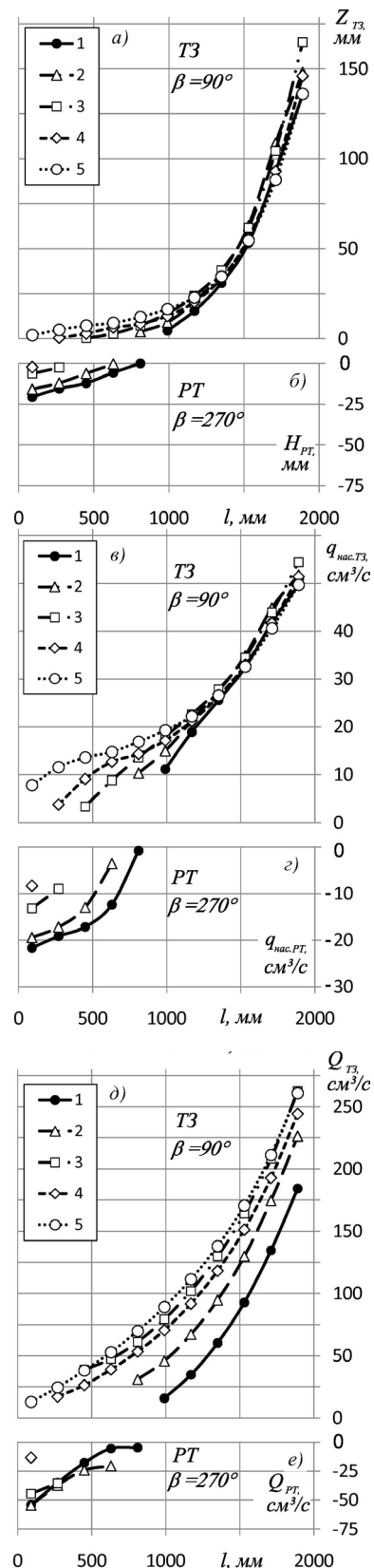


Рис. 7. Розподіл по довжині трубопроводу з  $D = 20,18$  мм і з насадками  $d = 8,02$  мм : а - робочих напорів на відрізку ТЗ; б - те саме, PT; в - витрат води крізь окремі насадки на відрізку ТЗ; г - те саме, PT; д - витрат води всередині трубопроводу на відрізку ТЗ; е - те саме, PT, при різних значеннях витрати транзитного потоку  $Q_{tr}$  в  $см^3/с$ : 75,81 - (1); 73,81 - (2); 57,52 - (3); 21,68 - (4); 5,11 - (5)



За відсутності транзитного потоку на вході в ТЗ роздачі рідини з нього не спостерігалось.

V. ЗАПРОПОНОВАНИЙ МЕТОД УСУНЕННЯ РОЗДАЧІ РІДИНИ З ТРУБОПРОВОДУ-ЗБИРАЧА

Нами запропоновано спосіб усунення роздачі рідини з напірного трубопроводу-збирача та забезпечення її притоку у ТЗ за наявності транзитної витрати рідини на вході в ТЗ [3]. Для цього в ТЗ у створах вхідних насадок (або вхідних отворів) закріплюють еластичні вставки (рис. 8), які локально стискають потік.

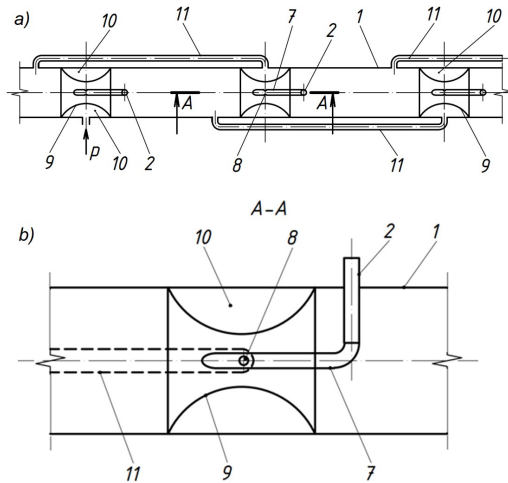


Рис. 8. Схема запропонованого трубопроводу-збирача: а – загальний вигляд; б – переріз А-А вузла з еластичною вставкою та вхідною насадкою: 1 – стінка ТЗ; 2 – вхідні насадки з відповідною трубкою 7; 8 – вихідний отвір відповідної трубки 7; 9 – еластична вставка; 10 – замкнений простір між внутрішньою стінкою ТЗ та еластичною вставкою 9; 11 – з’єднувальна трубка [3]

Між поверхнею еластичної вставки і внутрішньою стінкою ТЗ утворюється замкнений тороподібний простір. Останній з’єднують за допомогою трубки 11 з потоком в ТЗ перед попередньою вхідною насадкою. Таким чином тиск, наявний у створі потоку перед попередньою вхідною насадкою, передають у замкнений тороподібний простір нижчої за потоком насадки.

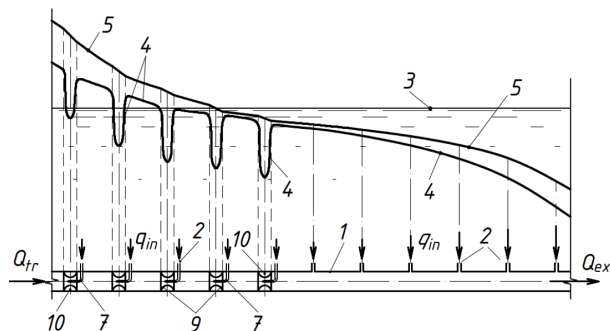


Рис. 9. П’єзометрична лінія та лінія повного напору потоку у напірному ТЗ, оснащеному локальними еластичними вставками, за наявності транзитного потоку  $Q_{tr}$  на вході у ТЗ (пояснення до цифрових позначень подано під рис. 8) [3]

За рахунок збільшення швидкості потоку у звуженому перерізі, створеному еластичною вставкою, тиск у ньому падає і стає меншим, ніж у замкненому просторі між еластичною вставкою і стінкою ТЗ. Сила, створювана різницею названих тисків, переміщає внутрішню частину еластичної вставки у радіальному напрямку до осі потоку. Тоді тиск у звуженому перерізі потоку стає меншим, ніж зовні ТЗ. Внаслідок цього витікання рідини з ТЗ припиняється та змінюється на її всмоктування в ТЗ (рис. 8).

Притік рідини в ТЗ забезпечується на кожному вхідному отворі, у створі котрого встановлено еластичну вставку (рис. 8, рис. 9).

VI. ВИСНОВКИ

В результаті експериментальних досліджень виявлено, що уведення транзитного потоку рідини у вхідний переріз напірного трубопроводу-збирача спричинює роздачу рідини на початковому відрізку його довжини. Запропоновано спосіб усунення роздачі рідини з напірного трубопроводу-збирача та забезпечення притоку рідини у ТЗ. Суть винайденого способу полягає у встановленні у ТЗ, у створах вхідних насадок, локальних еластичних звужувальних вставок. У замкнений тороподібний простір, утворений між еластичною звужувальною вставкою та внутрішньою стінкою ТЗ, подають тиск із створу ТЗ, що перед попередньою звужувальною вставкою. Сила цього тиску переміщає стінки еластичної звужувальної вставки у радіальному напрямку до осі ТЗ. Тиск у створі вихідного отвору вхідної насадки стає меншим, ніж зовні ТЗ. Витік рідини з ТЗ припиняється та змінюється на її всмоктування в ТЗ. Це відбувається на кожній із вхідних насадок, у створах яких встановлено еластичні звужувальні вставки.

REFERENCES

[1] Zhou, J., Ding, M., Bian, H., Zhang, Y., Sun, Zh. “Numerical investigation on the characteristic of the reverse flow phenomenon in a Z-type parallel compact heat exchanger with large number of tubes”. International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, Volume 6A2018, 26<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, London 22-26 July 2018, 141167. doi:10.1115/ICONE26-81242 (2018).

[2] Чернюк В. В., Іванів В. В. “Вплив транзитної витрати води на роздачу та притік крізь насадки в напірному трубопроводі”. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. Львів: “Львівська політехніка”, № 844, 2016. с. 216-227.

[3] Патент на винахід № 128075. Україна, МПК G05D 7/00, F17D 1/08, E02B 11/00, F16L 9/18. Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації / Чернюк В. В., Іванів В. В., Бігун І.В., Фасуляк В. С, Чернюк М. В. (Україна); Національний університет “Львівська політехніка”. – a202201571; Заявлено 16.05.2022. Опубліковано 28.03.2024, Бюлетень № 13, Український інститут інтелектуальної власності. – 5 с.



***СЕКЦІЯ 2***  
***ЕНЕРГЕТИКА ТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА***  
***ЕНЕРГІЇ***

# Classification Model for Effective Employee Segmentation

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.013>

Bogdan Boiko  
Lviv Polytechnic National University  
Lviv, Ukraine  
b.boiko@ukr.net

Iryna Protsyk  
Lviv Polytechnic National University  
Lviv, Ukraine  
iryna.s.procyk@ukr.net

**Abstract** – In this work, an efficient classification model for staff segmentation is developed. The ensemble is based on machine learning principles, allowing the exploration of the performance of various classification methods and the tuning of hyperparameters to optimize system performance. Additionally, it provides the ability to compare the metric results of trained models, enabling the selection of the best strategy for each problem. The work considers an efficient and automated data processing pipeline, which includes data collection, cleaning, and transformation processes that can be applied in various fields where efficient data processing is required.

**Keywords** – segmentation; classification methods; ensemble method; machine learning; Ensemble voting method

## I. INTRODUCTION

In today's increasingly competitive business world, employee engagement is becoming more challenging due to the difficulty in understanding who your employees are, which employees are beneficial for your business, and what they expect from your company. Additionally, effective advertising campaigns are becoming more expensive, raising the question of how to best allocate funds to capture the attention of staff [1].

Effective employee engagement continuously demands new solutions. Consequently, questions frequently arise regarding the development of new platforms that will help companies better understand newly recruited employees and their categories [2]. This became the primary goal of this work: the creation of a classification model for effectively engaging employees within the company. The subject area of this work explores the potential use of machine learning and data analysis techniques to develop this model, which will enable the classification of personnel [3].

With the increase in retail turnover, the number of business entities rises, leading to heightened competition. Therefore, the main problem this work aims to solve is the need to develop a model that can classify personnel, which will help enterprises better understand their needs in specific categories and provide them with more effective offers [4].

Another widespread problem is the incorrect targeting of advertising campaigns. Many companies often send

the same ad to all their staff, regardless of their interest [3]. This can result in a waste of the advertising budget on irrelevant ads, as it will not benefit an uninterested audience.

To optimize the advertising budget, it is crucial to define categories of users and send them targeted advertising. This approach will allow companies not only to save money on advertising but also to improve engagement with less engaged employees by offering a more personalized advertising approach [5].

The task of personnel classification in the context of effective engagement is highly relevant in today's world. While scientific articles and literature touch on this issue, the number of studies that address it in detail using classification methods is limited. However, there are articles and works that partially address this issue [6].

Currently, the amount of data worldwide is growing rapidly, prompting modern companies to actively use big data processing tools to efficiently and reliably manage these information sets. Therefore, developing a model that can be easily integrated with these tools or data processing pipelines is highly relevant today. The created model is easily integrated into existing data processing pipelines or other systems used by companies interested in our product, which makes our work very relevant. Additionally, it adds value by simplifying and automating the worker classification process [2].

## II. METHODS OF SOLVING

To improve forecasting quality, ensemble voting was used. Ensemble voting is a machine learning method that combines predictions from different models and selects the most popular prediction as the final decision. The main idea of the method is that each model may have its strengths and weaknesses and may contain errors [5]. However, combining their predictions can provide a more accurate and stable forecast. Thus, the ensemble method is a universal solution that accounts for all errors or shortcomings of other models' forecasts to achieve the most effective result.

For a better understanding of the ensemble voting method, let's schematically depict it in Figure 1:



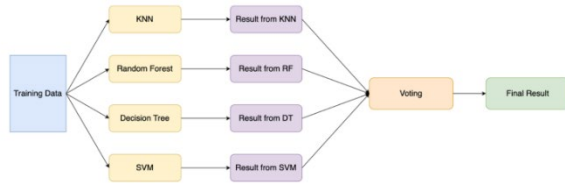


Figure 1. Ensemble Voting Method

As seen in the image, the voting method involves training four separate models on the full set of input data. Each of these models then makes its own predictions. After that, a voting process takes place, and the result that receives the majority vote among the models becomes the final outcome.

### III. RESULTS

After creating the ensemble using the following classification methods - K-NN, DT, RF, and SVM- the model was trained. Now, let's take a look at the results of all metrics and graphs for this model (Table 1):

Table 1. Metrics Results for the Ensemble

Metric	Train Result	Test Result
accuracy	0.9876	0.9625
precision	0.9888	0.9631
recall	0.9876	0.9625
F1	0.9852	0.9601

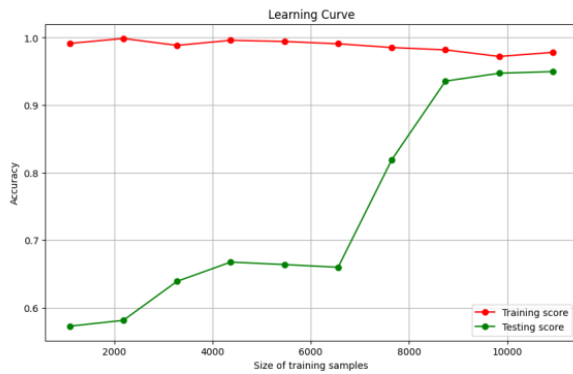


Figure 2. Learning Curve for the Ensemble

By analyzing the results of the metrics and graphs (Figure 2), you can see that this method provides excellent results for our personnel classification task. Indicators such as precision, recall, and F1-score are high, indicating very strong performance from our ensemble.

The learning curve is ascending and free of sudden jumps, which suggests that our training is effective and does not suffer from overfitting or underfitting.

There are a small number of errors in the confusion matrix, but these occur very infrequently, which is acceptable for machine learning tasks. This indicates that our system makes only a minimal number of

classification errors, resulting in predictions that are as accurate and efficient as possible.

After a detailed analysis and evaluation of all the results, it was concluded that the ensemble approach, combining K-NN, DT, RF, and SVM, is the most effective solution for the staff segmentation problem.

### IV. CONCLUSION

In today's competitive business environment, employee engagement remains a challenge due to the complexity of understanding employees' needs and expectations. To address this, the development of a classification model aimed at enhancing employee engagement is crucial. The application of machine learning techniques, particularly the ensemble voting method, proved to be highly effective in solving this problem. By combining multiple models, including K-NN, DT, RF, and SVM, the ensemble method produced highly accurate and stable predictions, as reflected in the evaluation metrics.

The results showed high values for accuracy, precision, recall, and F1-score, demonstrating the model's strong performance. The learning curve analysis further supported the model's reliability, as it exhibited consistent training without overfitting or underfitting. The minor classification errors indicated in the confusion matrix were within acceptable limits, further validating the system's efficacy.

In conclusion, the ensemble approach offers a robust and reliable solution for personnel classification, allowing companies to better understand and engage their employees. This approach can also optimize advertising efforts by targeting specific employee categories, resulting in both cost savings and increased engagement. The integration of this model into existing data processing pipelines ensures its relevance and applicability in modern businesses.

### REFERENCES

- [1] J. N. Sari, L. E. Nugroho, R. Ferdiana, P. I. Santosa, Review on Customer Segmentation Technique on Ecommerce. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2016, 22(10), 3018-3022, <https://doi.org/10.1166/asl.2016.7985>.
- [2] J. Akinsola, Supervised Machine Learning Algorithms: Classification and Comparison. *JET Akinsola's Lab*, 2017, 48(3), 128 – 138. <https://doi.org/10.14445/22312803/IJCTT-V48P126>.
- [3] A. A. Soofi, A. Awan, Classification Techniques in Machine Learning: Applications and Issues. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 2017, 13, 459-465. <https://doi.org/10.6000/1927-5129.2017.13.76>
- [4] V. Pulabaigari, H.S. Thogarcheti, An Improvement to k- Nearest Neighbor Classifier. *IEEE International Conference on Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS-2011)*, 2011. <https://doi.org/10.1109/RAICS.2011.6069307>
- [5] V. Ashok, R. R. Kamath, A. Rk, S. Singh, A. Bhati, Customer Segmentation in E- Commerce. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative*, 2021, 8(7), a908-a913.
- [6] R. Entezari-Maleki, A. Rezaei, B. Minaei-Bidgoli, Comparison of Classification Methods Based on the Type of Attributes and Sample Size. *Journal of Convergence Information Technology*, 2019, 4(3), 94-102. <https://doi.org/10.4156/jcit.vol4.issue3.14>.

# *Analysis of the Impact of External Factors on the Air Quality Index: a Machine Learning Approach*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.014>

Nataliya Boyko  
department of artificial intelligence systems  
Lviv Polytechnic National University  
Lviv, Ukraine  
Nataliya.i.boyko@lpnu.ua

Heorhii Petunin  
department of artificial intelligence systems  
Lviv Polytechnic National University  
Lviv, Ukraine  
heorhiipetunin@gmail.com

**Abstract** – In today's world, we often see governments introduce green laws that are actively advertised and promoted to the public. There is active promotion of the green agenda: They create comfortable conditions for electric car manufacturers, provide benefits for the purchase and use of electric cars to citizens, create and develop alternative ways of generating electricity instead of rough heating at thermal power plants, introduce standards for car exhaust emissions that limit manufacturers in production, try to get rid of factories that emit significant amounts of harmful substances into the air by moving them to other countries (Asian countries), leaving only collection workshops or enterprises whose impact is not significant within their country. All of this is done in order to improve air quality in their own country. Although all these changes often seem unnecessary or even harmful to the population and economy, what is the actual result of such actions? This paper presents an analysis of the air composition over the past 50 years, which proves the correctness of the decisions made. It also discusses possible trends in the growth of harmful substances in the air and why they did not materialize.

**Keywords** – green law; the Air Quality Index; Ecological Footprint; natural resources; the Extreme Gradient Boosted Decision Tree

## I. INTRODUCTION

The impact of external factors on air quality is largely the direct responsibility of people. Given the trends of recent decades, people are increasingly thinking about the feasibility of certain laws, projects or measures to improve air quality and reduce emissions of harmful substances into the atmosphere. By finding the extremes of the Air Quality Index (AQI) and comparing them with the years when certain green measures were introduced, we can clearly answer the question of the feasibility and effectiveness of these measures.

In recent years, governments worldwide have increasingly embraced green laws aimed at mitigating environmental degradation, particularly air pollution. Despite skepticism and concerns regarding economic implications, this paper conducts a comprehensive analysis of air composition over the past five decades to evaluate the efficacy of such policies.

The study reveals a discernible improvement in air quality, attributed to a range of legislative measures promoting sustainable practices. These include incentivizing electric vehicle adoption, stringent emissions standards for automobiles, and transitioning to alternative energy sources. Furthermore, the relocation of pollutant-emitting industries to regions with lax regulations has notably reduced domestic air pollution.

By examining historical trends and utilizing empirical data, this paper identifies the effectiveness of green laws in curbing harmful emissions. Contrary to fears of economic strain, the findings demonstrate that prioritizing environmental conservation can yield tangible benefits, including improved public health and enhanced quality of life. Additionally, the analysis offers insights into potential future trajectories, highlighting the sustainability of current policies in maintaining air quality standards.

## II. METHODS OF SOLVING

Since this work involves time series, well-structured data is essential. No ready-made data frames were found in the public domain, but monitors for individual substances were provided that were well structured by year. After analysing the data from sources [6] and [7], several files were identified that were suitable for converting into a single data set that could be processed by machine learning methods.

Each file had a lot of information about the countries: code, monitor types, etc. Therefore, the data was converted to the form 'Country + Year\_1970 + ... + Year\_2021'. This resulted in 3 samples of size 30x53. Later, using the obtained data frames, 4 samples were formed, which corresponds to the air quality index.

Since no reliable data on the air quality index for European countries were found, it was decided to generate it manually. Using a data frame of air quality index data from India [5], the XGBoost method was trained to predict the AQI using regression. This model was later used to calculate the AQI for European countries, which resulted in a sample size of 4.

MinMaxScaler doesn't reduce the effect of outliers, but it linearly scales them down into a fixed range, where the largest occurring data point corresponds to the maximum value and the smallest one corresponds to the minimum value (Equation 1).

$$X\_std = (X - X.min(axis = 0)) / (X.max(axis = 0) - X.min(axis = 0)) \quad (1)$$

$$X\_scaled = X\_std * (max - min) + min,$$

where  $min, max = feature\_range$ .

This estimator scales and translates each feature individually such that it is in the given range on the training set, e.g. between zero and one.

In this paper, this was used to bring the numerical data on the same parameters used to calculate the AQI to a single data range; this ensures that the model trained on one data set can be used correctly with new data on other countries.

XGBoost [8] uses Newton-Raphson Method in function space, unlike gradient boosting which works as gradient descent in function space, the loss function uses second order Taylor series to relate to Newton-Raphson method.

A general view of the non-regularised XGBoost algorithm:

- Input: training set  $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ ,
- differentiable loss function  $L(y, F(x))$ ,
- number of weak learners  $M$ ,
- learning rate  $\alpha$ .

Algorithm:

1. Initialise the model with a constant value (Equation 2):  $\hat{f}_{(0)}(x) = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^N L(y_i, \theta)$
2. For  $m = 1$  to  $M$ :
3. Calculate the "gradients" and "hessians" (Equation 3):

$$\hat{g}_m(x_i) = \left[ \frac{\partial L(y_i, f(x_i))}{\partial f(x_i)} \right]_{f(x)=\hat{f}_{(m-1)}(x)} \quad (3)$$

$$\hat{h}_m(x_i) = \left[ \frac{\partial^2 L(y_i, f(x_i))}{\partial f(x_i)^2} \right]_{f(x)=\hat{f}_{(m-1)}(x)}$$

4. Fit a basic/weak learner using the training set  $\left\{ x_i, \frac{\hat{g}_m(x_i)}{\hat{h}_m(x_i)} \right\}_{i=1}^N$ , by solving the following optimisation problem (Equation 4):

$$\hat{\phi}_m = \arg \min_{\phi \in \Phi} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \hat{h}_m(x_i) \left[ -\frac{\hat{g}_m(x_i)}{\hat{h}_m(x_i)} - \phi(x_i) \right]^2 \quad (4)$$

$$\hat{f}_m(x) = \alpha \hat{\phi}_m(x).$$

5. Model update (Equation 5):

$$\hat{f}_m(x) = \hat{f}_{(m-1)}(x) + \hat{f}_m(x). \quad (5)$$

6. Result (Equation 6):

$$\hat{f}(x) = \hat{f}_{(M)}(x) = \sum_{m=0}^M \hat{f}_m(x). \quad (6)$$

### III. EXPERIMENTS

Let's review the results that provide valuable visual representations of changes in substance concentrations over time, serving as important tools for analyzing air quality trends and evaluating the effectiveness of environmental policies and measures. Further analysis of these graphs, in conjunction with the estimated AQI data, can yield deeper insights into the dynamics of air pollution and the impacts of regulatory measures.

Figures 1, 2, 3 show graphs of changes in the content of these substances in the air each year in the range from 1970 to 2021.

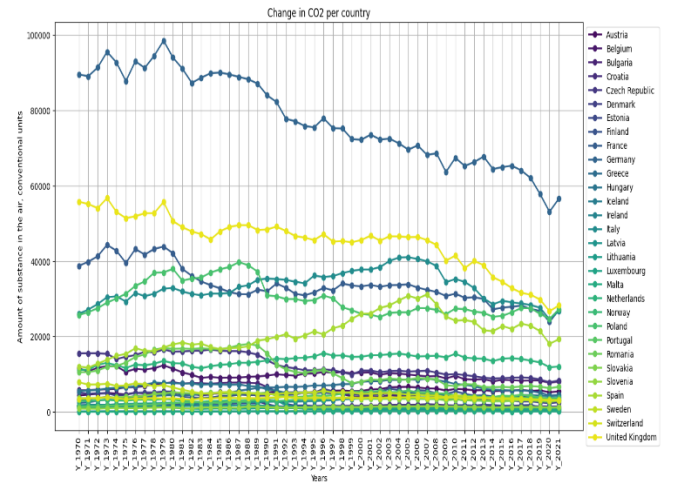


Figure 1. Change in CO<sub>2</sub> per country

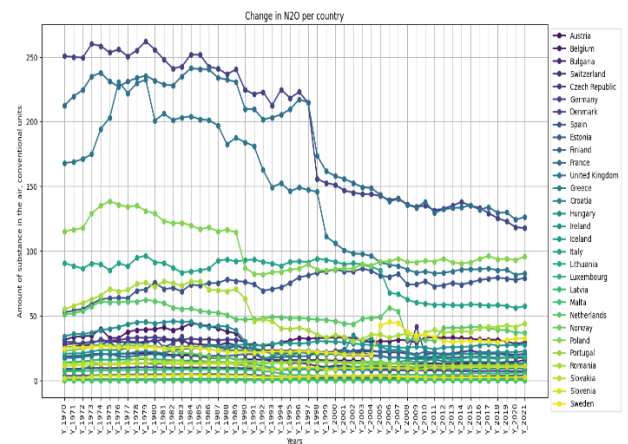


Figure 2. Change in N<sub>2</sub>O per country

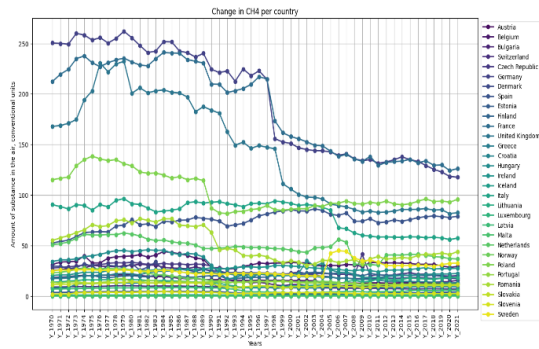


Figure 3. Change in CH4 per country

IV. RESULTS

At this stage, all the objectives were achieved, except for the construction of a sample with events that could affect the change in the air quality index. In general, some information about large countries has been collected, but it has not yet been structured and brought to the form of a sample.

However, the XGBoost machine learning method has now been implemented, with the model trained on alternative data (a sample with data on the content of certain harmful substances in the air and a reliable indicator of the air quality index). This approach allowed the model to be trained on real data, which made it possible to calculate the air quality index for each time series in European countries with an accuracy of 98%. We also processed a significant amount of data, which allowed us to collect, normalise and make available for analysis data on the air content of 3 harmful substances over the past 52 years.

The data was structured and illustrated with the help of graphs; this allows for a quick assessment of the extremes of both individual substances and the air quality index itself.

Given the results, this study can be used as a basis for the following research:

- It is possible to collect additional data for the time period corresponding to the one chosen in the study and conduct a more accurate analysis of the impact of certain substances on the air quality index.
- New approaches to solving the regression problem and predicting the growth or decline of the predicted value in the future can be tested on these samples.
- Since the impact of human activities on air quality change has not been previously assessed using machine learning methods, this work provides an impetus for the development of this topic.

This study also confirmed the opinion of other authors about the effectiveness of the machine learning method called XGBoost. Taking into account the positive experience of other authors, most of whom in modern studies note the high efficiency and accuracy of the same algorithm, it was used as a prototype in this study. The fact of its effectiveness was confirmed, as we managed to achieve high accuracy rates on both training and validation data. We were also pleased with the ease of use and additional customization of the algorithm architecture: there are many libraries that allow

calculating accuracy metrics for the regressor or classifier based on the chosen algorithm; it is possible to combine it with other popular algorithms; the training time for prediction is also satisfactory.

V. CONCLUSION

The data on the content of harmful substances in the air was collected. To be able to work with them using machine learning methods, all data was brought to a single standard and format. In addition, a new unique sample was created, containing air quality indices for each country in the time period from 1970 to 2021. This indicator is calculated with an accuracy of 97% or an absolute deviation of 11 conventional units in the range of values from 0 to 489.

A way to estimate the air quality index was proposed using a rather interesting approach: knowing the exact level of the air quality index in Indian cities, and having information on the content of all the substances considered in the paper, the XGBoost Regressor model was trained, which took into account only the parameters used in the analysis of European countries (although there were others in the sample) and showed an accuracy of 97% in calculating the AQI. Later, the data for European countries were brought to a similar numerical range as for Indian cities, which allowed the same model to be used to calculate the AQI for the selected countries. This approach provided a new sample of data, which was so lacking for the study.

Having evaluated the graphs obtained during the tests, we can say that the model estimated the AQI well, as for most countries the same dynamics can be clearly observed in the graphs of substance content and air quality level in pairs.

REFERENCES

- [1] O. Savvateeva, D. Sokolova, M. Semernya, Assessment of the Urban Air Environment Based on Bioindication Studies, in: IOP Conference Series Earth and Environmental Science, Volume 688(1), 2021, P. 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/688/1/012022>.
- [2] S. Subramaniam, N. Raju, A. Ganesan, N. Rajavel, M. Chenniappan, C. Prakash, A. Pramanik, A.K. Basak, S. Dixit, Artificial Intelligence Technologies for Forecasting Air Pollution and Human Health: A Narrative Review, in: Sustainability, Volume 14, 2022, 9951. <https://doi.org/10.3390/su14169951>.
- [3] B. Li, C. Liu, Q. Hu, M. Sun, C. Zhang, Y. Zhu, T. Liu, Y. Guo, G.R. Carmichael, M. Gao, A Deep Learning Approach to Increase the Value of Satellite Data for PM2.5 Monitoring in China, in: Remote Sens., Volume 15, 2023, 3724. <https://doi.org/10.3390/rs15153724>.
- [4] Bellinger, Colin, et al., Mapping historical air pollution levels in an urban environment using convolutional neural networks and ground-based imaging, in: Environmental Science & Technology, Volume 52.10, 2018, P. 6060-6067.
- [5] <https://www.kaggle.com/datasets/rohanrao/air-quality-data-in-india>
- [6] D. Carslaw, K. Ropkins, Openair—An R package for air quality data analysis, in: Environmental Modelling & Software, Volume 27, 2012, P. 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- [7] J. Boonphun, Ch. Kaisornsawad, P. Wongchaisuwat, Machine learning techniques for predicting air pollution: A review, in: Environment International, Volume 130, 2019, 104910. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912003004>
- [8] W. Wei, O. Ramalho, L. Malingre, Machine learning models for predicting indoor air quality parameters: A review, in: Sustainable Cities and Society, in: Indoor Air, Volume 52, 2020, 101864. <https://doi.org/10.1111/ina.12580>



# Using computer modeling during the design and reconstruction of hydropower facilities

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.015>

Oksana Halych

National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
o.o.halych@nuwm.edu.ua

Petr Nowak

Czech Technical University in Prague  
Prague, Czech Republic  
petr@nowak.cz

Eva Bílková

Czech Technical University in Prague  
Prague, Czech Republic  
eva.bilkova@fsv.cvut.cz

**Abstract** – The role of computer modeling during the design or reconstruction of the hydroelectric complexes is shown. The results of using the software HEC-RAS for the reconstruction of the Krimov Dam are given.

**Keywords** – modeling; hydropower engineering, hydroelectric complex; dam; flood, HEC-RAS.

## I. INTRODUCTION

The development of the energy sector of the national economy is aimed at increasing the share of electricity produced by renewable energy sources. Hydropower engineering is the largest and oldest source of renewable energy.

Since hydropower engineering has developed for many decades, there are hydroelectric complexes that are fifty years old or more. Hence, for many of them, the issue of reconstruction is acute.

In hydraulic engineering, physical modeling for building and reconstructing hydraulic structures is often used. However, due to the high cost of making a physical model and the time required for the modeling process, computer modeling is now widely used during the design and reconstruction of hydropower facilities.

## II. GENERAL INFORMATION ON HYDROELECTRIC COMPLEX

Usually, water is accumulated to meet the complex needs of the national economy. Practice shows that reservoirs created for operating hydropower plants with different capacities can be used for other purposes [1]. In particular, fish farms are being established, recreation centers are being built in the adjacent territories, and water from the reservoir can be used for both technical and drinking water supply, as the water quality does not change, but rather the opposite – the water passing through the turbine is enriched with dissolved oxygen during aeration, which helps to activate chemical and biological self-purification of water and has a positive impact on the natural regime of the river [2].

Moreover, hydropower plants with reservoirs regulate water flows and protect territories and settlements from floods. Many rivers in Europe have pronounced floods and flash floods, which flood the surrounding areas and cause destruction to the local population. In the case of the hydropower plants with reservoirs, the reservoirs manage to partially delay and reduce flood flow, which helps to avoid or significantly reduce material damage. Recently, scientists have been considering small hydropower plants as one of the effective measures to adapt to climate change, which resulted in a decrease in flood flow and an increase in the number of flash floods and their flow volumes. A river basin approach to water management is applied to reduce the negative impact. It limits the negative economic and social consequences, mitigates the effects of climate change, and increases energy capacity [3].

Taking into account mentioned above, the typical hydroelectric complex can consist of [4]:

- Dam for creation of water reservoir.
- Powerhouse for electricity generation.
- Shipping gateway for the passage of ships.
- Water spillway for flood passage.
- Water intake for water supply or irrigation.
- Fish passing facility.
- Headrace and tailrace canals.

During the design or reconstruction of any constructive elements of the hydroelectric complex the usage of computer modeling is very important. It helps to consider different variants of structures and choose the best one.

## III. MODELING OF TAILRACE CANAL OF KRIMOV DAM

To study computer modeling more deeply, the tailrace canal of Krimov Dam, Czech Republic, was modeled in HEC-RAS software.

A. Information on Krimow Dam

Krimov Dam is located near Chomytov in the Ústí nad Labem Region of the Czech Republic and was created to supply the town of Chomutov with drinking water [5, 6]. The Dam was built in 1958 and is 39.5 m high. As a typical dam, it has structures for flood control. They include two ungated spillways, two bottom outlets, a stilling basin, and a tailrace canal.

B. Stilling Basin and Tailrace Canal

For energy dissipation and flood water diversion from the dam, there are stilling basin and tailrace canal (Fig. 1).

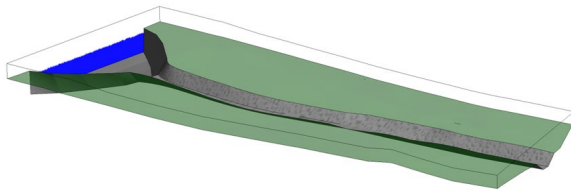


Figure 1. Scheme of stilling basin and tailrace canal

The stilling basin can be characterized by further features. It is shallow and short. Therefore, the curved shape of the stilling basin accelerates water outflow and reduces energy dissipation. It was constructed in the 50s with a much lower design discharge than nowadays.

The tailrace canal can be characterized by further features. It has the trapezoidal shape of a cross-section with different sizes. The inclination of the canal is rather high – about 5%. Moreover, it has a plane change of direction of 17°.

After significant flood events in 1997, 2002, and 2013 in the Czech Republic, new hydrological data were received, and the rules for flood control were restricted. Therefore, it was necessary to check whether new values of control flood  $Q = 74 \text{ m}^3/\text{s}$  could be safely passed through the stilling basin and tailrace canal.

C. Model Creation

For computer modeling, the open software HEC-RAS was used [7]. The boundary conditions for modeling are presented in table 1.

To make 2D modeling in HEC-RAS, the geometry of the stilling basin and tailrace canal was created (Fig. 2).

TABLE I. BOUNDARY CONDITIONS FOR MODELING

Parameters	Values
inflow	flow hydrograph
outflow	Rating curve
wall	Manning's coefficient
- stilling basin	$n = 0.015$
- canal	$n = 0.025$

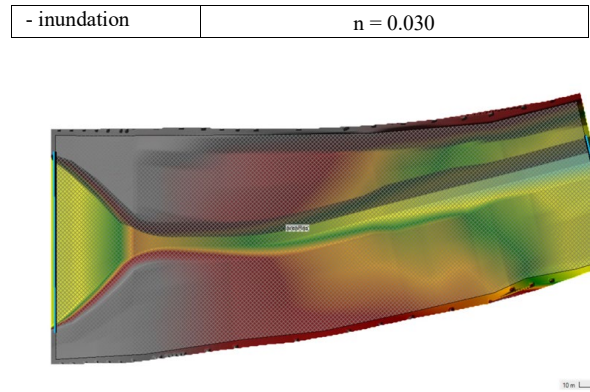


Figure 2. Geometry for 2D modeling

D. Results and Discussion

After making the 2D computation, the values of velocities and water surface elevation (WSE) were received (Fig. 3 and Fig. 4).

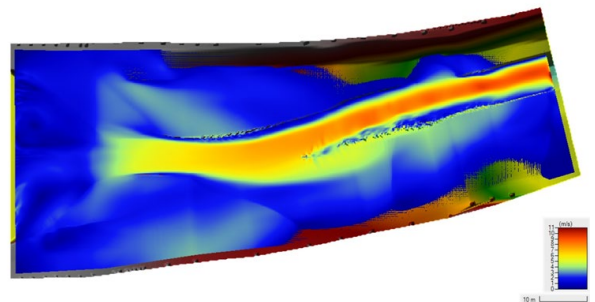


Figure 3. Velocity values of 2D modeling

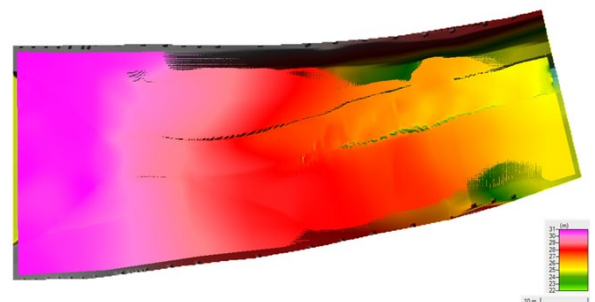


Figure 4. WSE values of 2D modeling

The longitudinal profile of the stilling basin and tailrace canal is shown in Fig. 5.

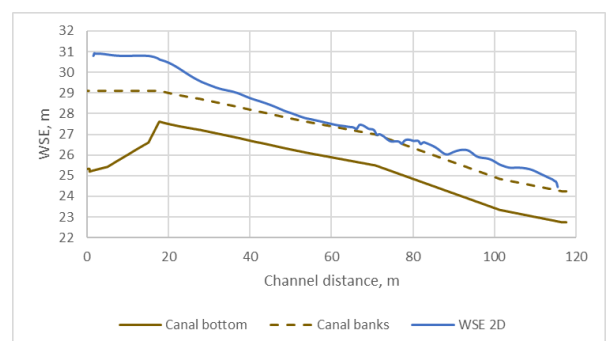


Figure 5. Longitudinal profile of the stilling basin and tailrace canal



## Modeling, control and information technologies – 2024

Figure 3 shows the velocity values in and outside the canal when the flood of  $74 \text{ m}^3/\text{s}$  will pass. Moreover, it is visible that due to the plane change of direction, part of the water will run in a straight line and not turn in the canal. The maximum value of velocity will reach  $11 \text{ m/s}$ .

Figure 4 shows the flooded area during passing the flood of  $74 \text{ m}^3/\text{s}$ . However, Figure 5 shows the depth of flooding. According to Figure 5, the highest depth will be near the stilling basin, confirming the fact that the existing design accelerates water outflow and reduces energy dissipation. The water surface level will exceed the level of stilling basin banks by  $2 \text{ m}$ . Therefore, almost all areas downstream of the dam will be flooded.

### CONCLUSIONS

Hydraulic and computer modeling in hydropower engineering is widely used. Since hydraulic modeling requires a lot of time and money, computer modeling, in many cases, is rather promising.

Computer modeling allows to study and analyze of different variants of situations and use the results during the design, building, or reconstruction stages.

The analysis of modeling results of the real facility shows that the existing form of stilling basin and tailrace

canal is not enough for safe flood passage of  $74 \text{ m}^3/\text{s}$ . To prevent flooding of adjacent areas, it is necessary to change the parameters of the stilling basin and tailrace canal.

### REFERENCES

- [1] Halych O, Bilková E, Nowak P, Riabenko O. Analysis of Hydropotential and Prospects for Small Hydropower Development in Ukraine. *Environmental and Climate Technologies*. 2023. 27. 763-74.
- [2] Bryl A.O., Vasko P.F., Moroz A.V. Regulatory and legal aspects of the use of hydropower potential of return waters of technological processes in Ukraine under the "green" tariff for generated electricity. *Renewable Energy*. Vol. 1. 2021., 59-69.
- [3] Yatsyk A.V., Tomiltseva A.I., Pashenyuk I.A. Environmental aspects of solving the development of small hydropower in the context of global warming (on the example of the Southern Bug and Ros rivers). *Hydropower engineering of Ukraine*. Vol. 1-2. 2016. 67-70.
- [4] Arndt R.E.A. *Hydropower Engineering Handbook*. McGraw-Hill, Inc. 1991. 667 ps.
- [5] Krimov Dam <https://krimov.czech-mountains.eu>
- [6] Chomutov <https://en.wikipedia.org/wiki/Chomutov>.
- [7] HEC-RAS. User's Manual. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>.

# Use of CFD for optimization of hydraulic structures and hydropower plants

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.016>

Ing. Petr Nowak, PhD.

Czech technical University in Prague  
Faculty of Civil Engineering  
Department of Hydraulic Structures  
Prague, the Czech Republic  
[petr.nowak@cvut.cz](mailto:petr.nowak@cvut.cz)

Ing. Eva Bílková, PhD.

Czech technical University in Prague  
Faculty of Civil Engineering  
Department of Hydraulic Structures  
Prague, the Czech Republic  
[eva.bilkova@cvut.cz](mailto:eva.bilkova@cvut.cz)

**Abstract** – This article deals with new possibilities of using mathematical modelling for optimization in the field of hydraulic engineering elements. Optimization allows to increase the performance of structures while reducing investment costs. An interesting area is the shape optimization of hydropower plant structural elements. Demonstrations of the use of CFD will also cover the area of design of custom hydro turbines.

**Keywords** – CFD, hydraulic structures, optimization, hydropower

## I. INTRODUCTION

In recent years, advancements in hardware performance have driven significant progress in CFD optimizations. While these optimizations are predominantly applied in mechanical engineering sectors such as turbines, aircraft, and ships, the field of hydraulic structures has lagged in adopting modern approaches. This disparity arises from the unique challenges and problems inherent to hydraulic engineering. Hydraulic structures are highly diverse and often atypical, featuring a wide range of water flow regimes. Consequently, they require bespoke solutions, as mass production is virtually non-existent in this field.

to create these components, incorporating the applicable criteria that follow.

## II. CFD FOR OPTIMIZATION OF HYDRAULIC STRUCTURES

Optimization of hydraulic structures is often constrained by the complexity and scope of computational tasks, as well as the demand for high accuracy, especially given the large dimensions of these structures. To maximize computational efficiency while maintaining sufficient accuracy and credibility, it is essential to simplify tasks as much as possible. Additionally, due to the scale of the structures, it is often necessary to limit the number of parameters describing their shape. This involves performing a sensitivity analysis to evaluate the impact of various parameters on the target objective function, allowing for the exclusion of parameters with minimal relevance before proceeding with optimization.

For instance, in the optimization of emergency spillways, bottom outlets, weirs, and navigation locks, it is often necessary to limit the number of parameters describing their shape. This involves performing a sensitivity analysis to evaluate the impact of various parameters on the target objective function, allowing for the exclusion of parameters with minimal relevance

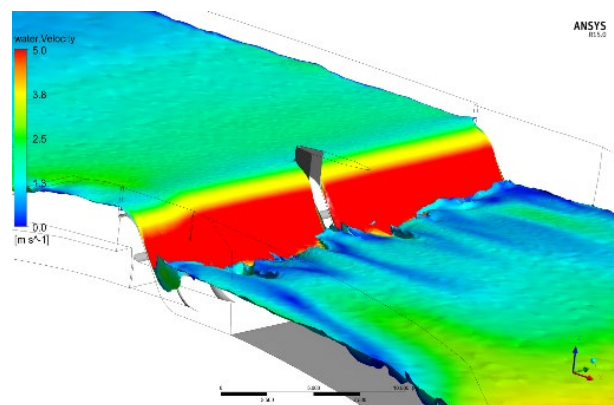


Figure 1. Klabava emergency overspill

Thanks to the CFD model we can obtain the exact water levels, velocities, tangential stresses, loads on given parts of hydraulic structures, under-pressure for cavitation assessment etc.

At the same time, it is advisable to examine the basic parameters of the spillway, especially the rating curves, i.e. the relationship between the elevation of the head water and the flow rate.

The optimization of hydraulic structures can be evaluated based on various criteria, such as the complexity of their shapes (standard, atypical, combinations, etc.) and the type of flow (steady vs. unsteady, single-phase vs. two-phase, etc.). A crucial aspect for practical applications is the economic benefits, which can be categorized into three types.

The first type involves revenue-enhancing optimizations of the design, such as intake structures of hydroelectric power plants (HPPs). The second type focuses on designs that reduce financial costs without direct financial returns, like the capacity of a spillway. The third type aims to meet specific construction criteria, such as optimizing the shape of the outflow section of an HPP to limit velocities and ensure safe navigation.

The increasing use of spatial models of structures, enriched with additional information (e.g., Building Information Modeling - BIM), and the growing integration of numerical flow modeling in the design of large water structures, contribute to reducing the overall cost of the optimization process. We anticipate that, with the advancement of these techniques, there will be a gradual and more widespread adoption of optimization processes in the field of hydraulic structure optimization.

### III. CFD FOR HYDROPOWER

CFD plays a very important role especially in the hydropower industry. Shape optimization of structures can result in reduced hydraulic losses, improved turbine inflow conditions. Increased homogeneity of the velocity field, reduced turbulence and pressure pulsations will translate into increased turbine efficiency, calming the operation of the entire system while extending the lifetime of a very expensive piece of equipment.

On the Odra River near Ratowice, Poland, the construction of the Ratowice SHPP on the right bank above the weir and the left-bank branch of the navigation canal is planned. The study aims to evaluate the suitability of two original variants of intake structures in terms of hydraulic losses and terms of homogeneity of the velocity field in front of fine trash racks. Another task is to identify areas that will pose a risk for sediment deposition. The variant was assessed by CFD analysis.

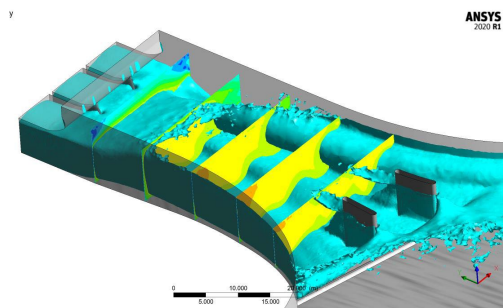


Figure 2. Example of low head HPP intake simulation

Based on the evaluation of two initially proposed variants, a third - compromise variant was subsequently presented. A total of 6 simulations were performed on three shape models of inlet objects. Concerning hydraulic losses, the most advantageous is the newly designed model III, which is also the shortest and, concerning the

length of vertical structures, the least investment intensive.

A practical demonstration shows optimization of the hydraulic design process of the whole turbine and shape optimization of blades. The fully parametric model of the entire turbine was created by CAESSES® software. After sensitivity analysis, the main hydraulic shape of the turbine was fixed. Free parameters include those describing the shape of guide vanes and runner blades and their mutual position.

The hydraulic performance of the turbine is evaluated based on flow simulation in CFD software ANSYS CFX® with the use of structured grids created in ANSYS TurboGrid®. For quick decision making, we use a stationary flow model calculation of components or a flow model of the whole turbine. The subjects of this evaluation are hydraulic efficiencies of turbine components and the whole turbine, cavitation characteristics and alternatively, additional parameters, e.g. the forces and torque on guide vanes.

Sensitivity analysis showed the influence of single parameters on required hydraulic characteristics. In the case of guide blades, we tested the effect of shape parameters on the hydraulic efficiency and torque loading. As for the runner blade, we tested the effect of shape parameters on its hydraulic efficiency, cavitation, and turbine discharge. Hydraulic efficiency and cavitation properties were improved by the optimization cycle using the MOGA algorithm built-in Dakota module of CAESSES®. The most suitable shape was chosen for subsequent testing.

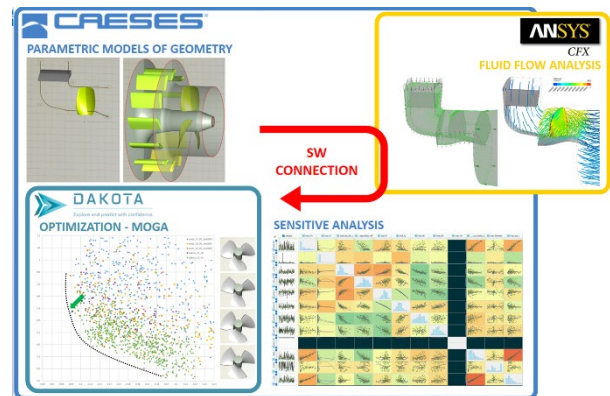


Figure 3. Workflow for automatic runner shape optimization

ACKNOWLEDGMENT

The project was supported by the Ministry of Foreign Affairs of the Czech Republic within the framework of humanitarian aid provided abroad – “Strengthening of professional capacities in the numerical modelling II”.

REFERENCES

- [1] MORANI, Maria Cristina, Mariana SIMÃO, Ignac GAZUR, Rui S. SANTOS, Armando CARRAVETTA, Oreste FECAROTTA a Helena M. RAMOS. Pressure Drop and Energy Recovery with a New Centrifugal Micro-Turbine: Fundamentals and Application in a Real WDN. *Energies*. 2022, 15(4). ISSN 1996-1073. <https://doi.org/10.3390/en15041528>
- [2] BINAMA, Maxime, Wen-Tao SU, Xiao-Bin LI, Feng-Chen LI, Xian-Zhu WEI a Shi AN. Investigation on pump as turbine (PAT) technical aspects for micro hydropower schemes: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 79, 148-179. ISSN 13640321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.071>
- [3] ALBERIZZI, Jacopo C., Massimiliano RENZI, Alessandra NIGRO a Mosè ROSSI. Study of a Pump-as-Turbine (PaT) speed control for a Water Distribution Network (WDN) in South-Tyrol subjected to high variable water flow rates. *Energy Procedia*. 2018, 148, 226-233. ISSN 18766102. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.072>
- [4] ÇELEBIOĞLU, Kutay a Alper KAPLAN. Development and Implementation of a Methodology for Reverse Engineering Design of Francis Turbine Runners. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*. 2019, 25(4), 430-439. ISSN 1300-7009. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.43959>
- [5] XU, Jian, Longyan WANG, Stephen NTIRI ASOMANI, Wei LUO a Rong LU. Improvement of Internal Flow Performance of a Centrifugal Pump-As-Turbine (PAT) by Impeller Geometric Optimization. *Mathematics*. 2020, 8(10). ISSN 2227-7390. <https://doi.org/10.3390/math8101714>
- [6] BREITBARTH, Andreas Martin Maximilian, Cornelius HAKE, Gunther NOTNI, Peter LEHMANN, Wolfgang OSTEN a Armando ALBERTAZZI GONÇALVES. Measurement accuracy and practical assessment of the lidar camera Intel RealSense L515. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII*. SPIE, 2021. ISBN 9781510643987. <https://doi.org/10.1117/12.2592570>
- [7] SERVI, Michaela, Elisa MUSSI, Andrea PROFILI, Rocco FURFERI, Yary VOLPE, Lapo GOVERNI a Francesco BUONAMICI. Metrological Characterization and Comparison of D415, D455, L515 RealSense Devices in the Close Range. *Sensors*. 2021, 21(22). ISSN 1424-8220. <https://doi.org/10.3390/s21227770>
- [8] HRČKOVÁ, Mária a Pavol KOLEDA. Application of Selected Reverse Engineering Procedures Based on Specific Requirements. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*. 2021, 4(1), 75-85. ISSN 2545-2827. <https://doi.org/10.2478/mape-2021-0007>
- [9] DI PAOLA, Francesco, Tommaso INGRASSIA, Mauro LO BRUTTO a Antonio MANCUSO. A reverse engineering approach to measure the deformations of a sailing yacht. *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing, 2017, 555-563. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. ISBN 978-3-319-45780-2. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9_56)
- [10] IEC 62006:2010: Hydraulic machines - Acceptance tests of small hydroelectric installations. 1.0. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.
- [11] VERSTEEG, H. K. a W. MALALASEKERA. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2nd ed. Harlow: Pearson Prentice Hall, 2007. ISBN 978-013-1274-983.
- [12] CELIK, Ismail B. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*. 2008, 130(7), 4. ISSN 00982202. <https://doi.org/10.1115/1.2960953>
- [13] ROACHE, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. *Journal of Fluids Engineering*. 1994, 116(3), 405-413. ISSN 0098-2202. <https://doi.org/10.1115/1.2910291>
- [14] PETIT, O, B MULU, H NILSSON a M CERVANTES. Comparison of numerical and experimental results of the flow in the U9 Kaplan turbine model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2010, 12. ISSN 1755-1315. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/12/1/012024>
- [15] MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994, 32(8), 1598-1605. ISSN 0001-1452. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [16] SMIRNOV, Pavel E. a Florian R. MENTER. Sensitization of the SST Turbulence Model to Rotation and Curvature by Applying the Spalart-Shur Correction Term. Volume 6: *Turbomachinery, Parts A, B, and C*. ASME/EDC, 2008, 2305-2314. ISBN 978-0-7918-4316-1. <https://doi.org/10.1115/GT2008-50480>
- [17] BENIGNI, Helmut, Helmut JABERG a Jürgen SCHIFFER. NUMERICAL SIMULATION AND OPTIMISATION OF POWERPLANT EQUIPMENT WITH PROJECT REALISATION. In: *Conference: Vienna HydroAt: Laxenburg / Wien*. 2010, s. 10.
- [18] MUNDET, Augustí, Victor Hugo HIDALGO a Xavier ESCALER. Numerical simulation of cavitation in a Francis runner under different operating conditions. In: *International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow*. "The 3rd International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow Shanghai, China, April 19th-22nd, 2019 ISCM2019: accepted abstracts, full papers". [online]. Shanghai: Shanghai University Press, 2019, s. 1-8 [cit. 2023-06-27]. Available from: <http://www.iscm2019.org/index.asp>
- [19] KANTOR, Martin, Milan CHALUPA, Jiří SOUČEK, Eva BÍLKOVA a Petr NOWAK. Application of genetic algorithm methods for water turbine blade shape optimization. *Manufacturing Technology*. 2020, 20(4), 453-458. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.072>



# *Prospects for Small Hydropower in Ukraine in the Context of Feasibility and Environmental Impact: Summarising after the World Small Hydropower Development Report 2022*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.017>

Dmytro Stefanyshyn

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NAS of Ukraine

Kyiv, Ukraine

d.v.stefanyshyn@gmail.com

**Abstract** – The use of renewable energy and decentralization of energy generation in Ukraine has become a crucial and topical problem because of the war and devastating Russian enemies' attacks on the Ukrainian critical energy infrastructure. Localized renewable energy generation stimulates humanitarian engineering that can support community peace-sustainability. However, before decision-making, appropriate resources and opportunities should be analyzed. An optimal way for a local energy generation portfolio development has to include a comprehensive feasibility analysis of projects accounting for key enablers and barriers and a full-fledged holistic environmental impact analysis of proposed technologies. At the same time, unworthy speculations touching people suffering have to be excluded, especially on the side of investors interested in the profits of the feed-in tariff. This article analyzes prospects for small hydropower in Ukraine in the context of its feasibility and environmental impact. The principal aim of the article is to answer the two questions. The first one is whether small-scale hydropower in Ukraine can principally pretend to play an essential role in localized renewable energy supply. The second one is whether the environmental impact of small hydropower in the country would be admissible in social and ecological contexts. The article is based on the World Small Hydropower Development Report 2022 materials, primarily regarding Ukraine.

**Keywords** – decentralization; environmental impact; feasibility; feed-in tariff; hydropower potential; renewable energy; small hydropower

## I. INTRODUCTION

Ukraine defines small hydropower (SHP) as hydropower plants (HPPs) with not more than 10 MW of installed capacity. In addition, HPPs with less than 200 kW of installed capacity are classified as micro- and those within the 200 kW and less than 1 MW range as mini-HPPs. Primarily this classification is explained by the assignment of the feed-in tariffs (FITs) value. The FIT is the largest for installations with a capacity of up to 200 kW and the smallest for small HPPs with a capacity of 1 MW or more, minimally ranging from 0.175 to 0.091 EUR/kWh exclusive of VAT on 31 Dec 2024 depending on commissioning date [1].

Although Ukraine has a relatively developed river network formed by more than 63,000 rivers and streams [2], the total feasible hydropower potential in the country, considering its area, is one of the lowest in Europe and the world [3]. It is estimated at 17-18 billion kWh in a year, while, for example, in Austria, whose area is almost 7.2 times smaller than the area of Ukraine – 53.7 billion kWh [4]. In length, more than 93 % of local watercourses are less than 10 km [2]. Many small rivers flowing through Ukrainian territory, where small HPPs are situated or planned, show a relatively low and uneven runoff, with up to 70 % or more of their annual runoff occurring during short periods of floods [2, 3]. In addition, most rivers have relatively small height differences from source to mouth. For rivers of the Dnieper basin covering nearly 65 % of the country's area it does not exceed 50–70 m, and in the Southern Bug basin (10.6 % of Ukraine's area) is about 100–150 m. In the Carpathians only (5%), rivers have a slightly greater height difference along streams, rarely exceeding 300-400 m [4]. Climate change is another concern for hydropower in Ukraine [5]. Among the main effects of climate change are: warmer winters and the frequent absence of a seasonal snow cover in much of the country [1, 2], whereas the hydrological regimes of the majority of Ukrainian's rivers depend on snow-melting. Heatwaves and long summer droughts are also becoming more common, so local rivers are experiencing declining runoff [2, 5].

The share of hydropower in the renewable energy mix of Ukraine in total decreased almost twice between 2010 and the first quarter of 2020, from 98.4 % to 44.9 %. SHP in 2020 accounted for less than 2 % of all hydropower production [3]. In turn, SHP plants yielded in the first quarter of 2020 less than 4.0 % of all electricity production of non-traditional renewable energy sources (excluding large hydropower), despite SHP belonging to the private sector and being eligible to benefit from the FIT. Primarily, this resulted from the development of other renewable energy technologies, mainly solar and wind power [1]. However, the main reason SHP does not play an essential role in Ukraine's renewable energy is the poor hydropower potential.

### II. SMALL HYDROPOWER DEVELOPMENT IN UKRAINE: BEFORE AND AFTER FEED-IN TARIFF

#### A. Before the feed-in tariff

Small hydropower (SHP) should not be considered in terms of alternative renewable energy, because there has been more than a century of experience applying low-power hydraulic installations. The first HPPs were “small” by modern standards. For example, in the USA, although SHP has been considered an acceptable technology in most states’ standard renewable energy portfolios (solar, wind, bio, hydropower), there are essential restrictions on new hydropower projects in such portfolios. This is explained by the technological maturity of hydropower, its stable financial standing, and environmental concerns [6].

The first HPP in modern Ukraine’s territory was built in 1890 in Friedeshovo village (now Kolchyno, the Transcarpathian Region). The HPP had a capacity of about 200 kW. In central Ukraine, the first HPP with a capacity of 50 kW was built on the Southern Bug River in 1912 in the town of Tyvriiv (the Vinnytsia region). Before the commissioning of the Dniprovaska HPP (Dniproges) with a capacity of 640 MW in 1932, more than 150 HPPs were already operating in Ukraine, with a total capacity of about 8.4 MW [7]. Currently, they could have been defined as small HPPs. Mass construction of small HPPs in Ukraine started only after the Second World War. It was the period when the electrification of the country’s agricultural areas was done with a combination of centralized and local energy supply. At the end of the 1960s, almost 1,000 small HPPs were operating in Ukraine. Most of them had a capacity of 5-25 kW. However, in the 1970s, with the development of large thermal, nuclear and hydropower plants in the USSR, the energy supply became more centralized and interest in small HPPs in Ukraine started to disappear. As a result, by the end of the 80s, only 49 small HPPs were operated in the country [7]. At the same time, contrary to Ukraine, in many countries, small hydropower has continued developing steadily since the commissioning of the first hydropower installations and until now [1, 3]. Admittedly, the main incentive for the stable development of small hydropower in the world was and remains the local factor [1, 3], when, along with available and significant hydropower potential capable of fully satisfying local needs, there is considerable complexity in the organization of centralized power supply. Then small HPPs become acceptable for local communities and profitable to produce in conditions of being local-constricted. For example, in Austria, only 2,882 HPPs out of more than 5,200 in 2015 were connected to the national grid. Others (mainly micro and mini HPPs with a capacity of up to 0.5 MW) worked for individual consumers or in local grids [8].

#### B. After the feed-in tariff

In 2009, the year of amendments to the Law of Ukraine “On Electric Power” [1, 7], which introduced the feed-in tariffs (FITs) for the state’s purchase of electricity produced by alternative energy facilities, in particular, small HPPs, in the country there were only 46 small HPPs under operation with a total installed capacity of 49.2 MW. In 2010, there were 60 small HPPs (62.6 MW), in 2011 - 72 (70.8 MW), and in 2012

- 80 installations (73.5 MW) [9]. From this time, the number of reconstructed, modernized, and new small HPPs began to enlarge annually. In 2019, 157 small HPPs, with a total installed capacity of 114 MW, generated 242 GWh of electricity in Ukraine. In 2020, there were 167 small HPPs with a total installed capacity of more than 119 MW. In 2021, their number increased by 9 new installations and reached 176 [1, 3]. New small HPPs have been built as part of existing cascades that are already in operation (on the Southern Bug and its tributaries, as well as Sluch, Ros’ and Seret Rivers) and on some free-flowing rivers (mainly on the rivers of the Ukrainian Carpathians). As for the social context, SHP in Ukraine is part of the country’s Integrated Power System (IPS). None of the small HPPs in the country are stand-alone or related to independent schemes supplying electricity for local communities or any private needs [3], which is common world practice. At the same time, all small HPPs in the country belong to the private sector and have been developed eligible to benefit from the FIT [3]. The possibility of setting facilities on river sites favorable to private investors, first of all for easy connection to the IPS and eligibility to the FIT contributes to the fact that the number of small HPPs in the country continues to grow steadfastly [10]. Often small HPPs in Ukraine are developed spontaneously, without due regard for environmental issues. There have been numerous cases when small HPPs destroy untouched river ecosystems and harm local communities [3, 9]. There were many examples of non-compliance with existing building codes, violations of Ukraine’s Water Code requirements, and the requirements of the Law of Ukraine on “Environmental Impact Assessment” (EIA) on the side of both SHP developers and regulatory agencies [3, 11].

### III. IS SMALL HYDROPOWER ABLE TO PROMOTE TACKLING ENERGY PROBLEMS IN UKRAINE?

Scientific articles and technical documents show several estimates of the total technical hydropower potential of SHP in Ukraine. They range from 280.0 MW to 1,140.0 MW installed capacity [1, 7]. The total feasible technical hydropower potential is estimated at up to 375 MW installed capacity [7]. The recent results of a market assessment of SHP rehabilitation in Ukraine by the World Bank indicated a total feasible technical potential for SHP development (including currently installed capacity) of approximately 280 MW [1, 12].

First of all, in assessing the unused hydropower potential of SHP in Ukraine, small and medium-sized rivers are mentioned, often mostly untouched rivers, for example, in the Carpathian region [7]. At the same time, Ukraine has a so-called “hidden” hydropower potential for SHP development. It can hide in existing non-powered dams, thousands of municipal and industrial reservoirs and ponds [2], and the widespread sewage and wastewater treatment infrastructure [3, 13, 14]. This hidden potential has not yet been thoroughly studied in the country although it could boost the implementation of successful SHP projects while reducing their potential adverse environmental impacts [3]. Two examples of SHP development in the country on wastewater treatment infrastructure (the Poltava small HPP, installed capacity of 190 kW, and the Kapustyanska small HPP, installed capacity of 484 kW) demonstrate



that small hydropower projects can be economically attractive and environmentally friendly [3].

However, the question of the real possibilities of SHP to tackle energy problems in Ukraine [4, 9, 15], in particular at the local level, taking into account energy decentralization purposes, remains relevant, and not only in the context of the completeness and correctness of the estimation of the available SHP’s potential, including the involvement of “hidden” hydropower potential of the existing water infrastructure [1, 3].

Analysis of SHP development after feed-in tariff (FIT) implementation shows between 2013 and 2020, the installed capacity utilization rate (ICUR) of SHP in Ukraine decreased from approximately 44 % to 20 % (Table 1). At the beginning of 2020, the ICUR value with a 50 % exceedance probability was about 17 %, and its value with an 80 % exceedance probability was only about 9 % (Fig. 1). That is, 50% of the installed capacity of the domestic SHP had a 17% guarantee for use in need, and 80% provided only a 9% one. Firstly, it might be explained by the reduction of river runoff within the territory of Ukraine because of climate change and human activity on watersheds. Secondly, it might be explained by insufficient substantiation of new projects, for example, due to the overestimation of feasible hydropower potential [1, 3].

TABLE I. THE SMALL HYDROPOWER DEVELOPMENT DYNAMIC IN UKRAINE BETWEEN 2013 AND 2020

Year	Indicators		
	Installed capacity (MW)	Electricity production (GWh)	ICUR <sup>a</sup> (%)
2013	75	286	44
2014	80	251	36
2015	87	172	23
2016	90	189	24
2017	95	212	25
2018	99	231	27
2019	114	242	24
2020	119	209	20

a. ICUR – Installed capacity utilization rate

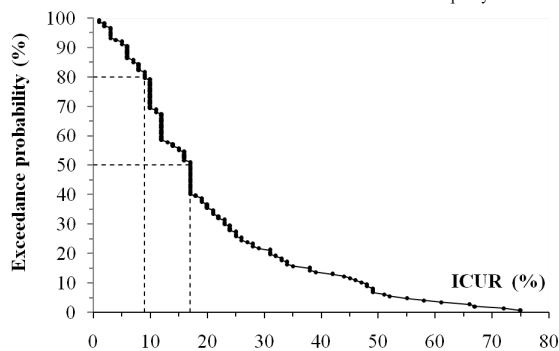


Figure 1. The ICUR values exceedance probability curve for 146 Ukrainian small HPPs as of the beginning of 2020

It should be noted that private owners of small HPPs in Ukraine have the right to freely supply the generated electricity to the IPS, unlike large HPPs that take part in regulation and are used as an emergency reserve. Due to the FIT, they are interested in producing more electricity

and in the high ICUR values. So, small values of the ICUR may indicate insufficient reliability of domestic SHP as a stable energy producer in local power grids. For comparison, in 2019, the domestic wind energy industry reached the similar ICUR’s value of 20% [1]. It should also be mentioned that many Ukrainian entrepreneurs focus on developing small HPPs with a capacity of up to 200 kW. Among installations put into operation in the last years, more than 80 % have a capacity not exceeding 200 kW and more than 43 % of all operating small HPPs in Ukraine have an installed capacity not exceeding 200 kW [10]. Thus, in the local dimension, for example within the modern rural community etc., such an installation can be considered only as a component of a diversified energy portfolio, as independently it can meet the needs of a quite limited range of consumers. There is a question will it be beneficial for the community to have a small HPP of its energy portfolio? There is also a question about the feasibility of using a small HPP as an emergency reserve, which can make it unprofitable even under feed-in tariff conditions.

Overall, the current regulatory framework of Ukraine provides good opportunities for the development of SHP in the country [1], sometimes even contrary to current legislation [11] and common sense in the context of feasibility [15]. It should be considered that small hydropower in Ukraine has now attained a poor reputation among numerous communities and environmentalists due to environmental issues caused by previous unsuccessful small HPP projects [1, 9, 11]. Therefore, environmental issues associated with SHP could be a high challenge in the future, if not properly addressed. For example, in 2017 the Chizhiv’ska small HPP near the city of Zviagel’ appeared to be implicated in the extreme decline of water levels in the Sluch River, which required the temporary suspension of the plant’s operation and a subsequent resumption of operation at reduced water discharges [11]. In particular, The World Wildlife Fund (WWF) in Ukraine [16] has repeatedly emphasized that the uncontrolled SHP development in the country can lead to the extinction of unique fish species and other aquatic organisms, deterioration of water quality, adverse changes in drainage and hydro-morphological regimes of rivers, etc. These impacts can also be exterritorial, spreading to other sections of the river and riparian areas downstream of the river, for tens and more kilometers, the consequences of which are practically impossible to minimize with traditional compensatory measures.

#### IV. THE SLUCH RIVER CASE

The Sluch River case can be mentioned as one of the indicative examples of both the poor performance and adverse environmental impact of SHP in Ukraine.

The Sluch River has a length of 451 km ranking as the 18th longest river in Ukraine. The river flows in Khmelnytsky, Zhytomyr and Rivne regions. The river catchment area is 13,800 km<sup>2</sup> and is found in the thirty in the country. The river drop is 181.0 m, the average slope of the water surface is 0.4 ‰. The Sluch River is the longest river of the fourth order in Ukraine, first flowing into the Horyn River before joining the Pripyat, which eventually feeds into the Dnieper [17].

Nine small HPPs are located on the Sluch River in Khmelnytskyi and Zhytomyr regions, with another small HPP (Novolabuns'ka) on its largest tributary, the Khomora River (Table 2). The total installed capacity of the Sluchans'ky cascade of ten small HPPs is 3,457 kW. The average installed capacity utilization rate is 14.2%.

TABLE II. HYDROPOWER IN THE SLUCH RIVER BASIN

Name of small hydropower plant	Indicators		
	Launch year/ restoration	Capacity (kW)	ICUR <sup>a</sup> (%)
Baranivs'ka	2017	382	10
Gubyns'ka	2014	200	16
Korzhivs'ka	1953/2004	320	10
Lubars'ka	1950/2006	200	11
Myropil's'ka	1958	500	8
Pedynkivs'ka	1959	600	11
Samchyky	2015	160	16
Chizhivs'ka	1951/2015	600	28
Chortoryis'ka	2013	363	10
Novolabuns'ka	2013	132	22

a. ICUR – Installed capacity utilization rate

Are there any questions about the feasibility of these SHPs compared to other technologies in reliability, affordability and efficiency, both the wide-country and local levels even without considering the serious harm made to the Sluch River ecosystem [11, 17]?

V. CONCLUSIONS

Private investors aim to promote SHP as an environmentally friendly alternative to other energy sources, including large hydropower. However, in the Ukrainian case, it is not quite clear if the impact of SHP on the environment is acceptable when comparing the adverse consequences with the energy possibilities.

At the same time, settling small hydro installations on existing infrastructure, especially critical ones, to provide an emergency reserve and contribute to energy saving may be feasible even without a FIT. Moreover, hardly similar small HPPs will provoke conflicts with local communities and hurt river ecosystems.

ACKNOWLEDGMENT

This work became possible thanks to the kind invitation to be a contributing author for the United Nations Industrial Development Organization-International Center on Small Hydro Power (UNIDO-ICSHP) publication The World Small Hydropower Development Report 2022 (WSHPDR 2022).

REFERENCES

[1] World Small Hydropower Development Report 2022, Eastern Europe, D. Stefanyshyn, "Ukraine," UNIDO, Vienna, Austria;

ICSHP, Hangzhou, China, 2022, pp. 72-82. Available at [www.unido.org/WSHPDR2022](http://www.unido.org/WSHPDR2022).

[2] V.K. Khilchevskiy, V.V. Grebin, and N.P. Sherstyuk, "Modern hydrographic and water management zoning of Ukraine's territory – implementation of the WFD-2000/60/EC," Proc. of the XXVII Conf. of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Kyiv, Ukraine, November 6-8, 2019, pp 209-223.

[3] World Small Hydropower Development Report 2022, Case Studies, D. Stefanyshyn, and A. Petrosian, "Unlocking the hidden hydropower potential of wastewater treatment facilities (Ukraine)," UNIDO, Vienna, ICSHP, Hangzhou, 2022, pp. 58-62. Available at [www.unido.org/WSHPDR2022](http://www.unido.org/WSHPDR2022).

[4] D. Stefanyshyn, "On peculiarities of hydropower development in the world and in Ukraine," Env. Safety and Nat. Resources, vol. 25 (1), Kyiv, KNUBA, ITGIP NASU, 2018, pp. 12-23.

[5] S. Pritchard, "European insights: hydropower, climate change and EU law," Intt. Water Power and Dam Constr., FREE Newsletter Latest hydro news and tech., 12 November, 2019.

[6] V. Stori, "Environmental Rules for Hydropower in State Renewable portfolio Standards," Clean Energy States Alliance, final-v2, 2013. Available at <https://bit.ly/3yPEcNe>.

[7] O. Halych, E. Bilkova, P. Nowak, and O. Riabenko, "Analysis of Hydropotential and Prospects for Small Hydropower Development in Ukraine," Environmental and Climate Technologies, vol. 27, no. 1, 2023, pp. 763-774.

[8] B. Wagner, Ch. Hauer, A. Schoder, and H. Habersack, "A review of hydropower in Austria: Past, present and future development," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 50, 2015, pp. 304-314.

[9] D. V. Stefanyshyn, and Yu. S. Vlasyuk, "To the issue of comparative analysis of hydropower characteristics of small and large hydroelectric power stations of Ukraine as part of hydroelectric power stations with reservoirs," Mathematical modeling in economics, No. 2, 2018, pp. 71-83 (In Ukrainian). Available at [http://nbuv.gov.ua/UJRN/mmve\\_2018\\_2\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/mmve_2018_2_8).

[10] Renewable assets. Energo.UA. Available at <https://www.energo.ua/en/assets>.

[11] D. V. Stefanyshyn, and Yu. S. Vlasiuk, "Some critical comments on the quality of environmental impact assessment reports for small hydropower plants in Ukraine," Env. Safety and Nat. Resources, 32 (4), 2019, pp. 43-59 (In Ukrainian).

[12] World Bank, "The Executive Summary - Market Assessment of Small Hydropower Plants in Ukraine," P161875, World Bank Document, Public Disclosure Authorized, 2019.

[13] G. San Bruno, A. Choulot, and V. Denis, "Energy recovery in existing infrastructures with small hydropower plants," Multipurpose schemes - Overview and examples, Brussels, European Small Hydropower Association (ESHA), Achieved in Montcherand, Switzerland, June 2010.

[14] A. McNabola, P. Coughlan, L. Corcoran, Ch. Power, A. Prysor Williams, I. Harris, J. Gallagher, and D. Styles, "Energy recovery in the water industry using micro-hydropower: An opportunity to improve sustainability," Water Policy, 16, 2014, pp. 168-183.

[15] D. V. Stefanyshyn, "Feasibility analysis of construction of new hydropower plants in Ukraine taking into account the risk of unused possibilities," Env. Safety and Nat. Resources, 31 (3), 2019, pp. 33-45.

[16] WWF position paper on small hydropower development in Ukraine, World Wildlife Fund (WWF), 2018. Available at <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/position-SHPPs-eng.pdf>.

[17] V. Korbutiak, D. Stefanyshyn, V. Martyniuk, Y. Khodnevych, A. Lishchynskiy, and Zh. Nakonechna, "About ecologically safe water resource use in the Sluch river basin," 17th Int. Conf. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov. 2023, vol. 2023, pp. 1-5.

# Гідроекологічні аспекти реконструкції малих ГЕС (на прикладі р. Південний Буг)

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.018>

Тетяна Басюк  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[t.o.basyuk@nuwm.edu.ua](mailto:t.o.basyuk@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – розглянуто гідрологічні та екологічні аспекти реконструкції малих ГЕС на р. Південний Буг. Здійснено оцінку можливих екологічних наслідків реконструкції водосховищ та обґрунтовано рекомендації щодо мінімізації негативного впливу на довкілля.

**Ключові слова** – гідроенергетика, водосховище, переформатування берегів, якість води гідрологічний режим.

## I. ВСТУП

Розвиток відновлювальної енергетики в Україні набуває особливої актуальності в контексті енергетичної безпеки та збереження довкілля. Мала гідроенергетика є одним з найчистіших та найстабільніших джерел відновлюваної енергії. Відсутність шкідливих викидів та мінімальний вплив на навколишнє середовище роблять малі гідроелектростанції (МГЕС) перспективним напрямком розвитку енергетики. МГЕС не лише виробляють електроенергію, але й сприяють збереженню водних ресурсів та біорізноманіття, підтримуючи екологічний баланс регіонів [2; 4; 5; 10].

Модернізація існуючих МГЕС шляхом реконструкції обладнання або зміни рівневого режиму водосховищ розглядається як потенційний шлях збільшення їх потужності. Однак, такі зміни можуть призвести до значних гідроекологічних наслідків, таких як: збільшення площі затоплення заплавної території, зменшення біологічного різноманіття, погіршення якості води, деградація прибережних екосистем, тощо [10].

## II. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом досліджень є Сутиське, Брацлавське та Чернятське водосховища гідроенергетичного призначення, які розміщені в середній частині р. Південний Буг у межах Вінницької області.

На початковому етапі дослідження було здійснено комплексний аналіз літературних джерел та архівних матеріалів, присвячених природним умовам та екологічному стану водосховищ на річці Південний Буг (рисунок). Зокрема, увагу було зосереджено на: фізико-географічних характеристиках регіону (клімат, рельєф, геологічна будова, ґрунтовий покрив); гідрологічних умовах (гідрографічна мережа,

режим річки, якість води); біологічному різноманітті (видовий склад флори і фауни, особливо гідробіонтів та іхтіофауни); інженерно-геологічних умовах (геологічна будова прибережних зон, процеси берегової ерозії та акумуляції). Також було проведено оцінку техніко-економічної доцільності підвищення рівня води у водосховищах на 1,0 метр за умови збереження існуючого режиму їх експлуатації.

На основі отриманих даних було розроблено інформаційну базу, яка дозволила: оцінити сучасний екологічний стан водосховищ; прогнозувати потенційні екологічні наслідки реконструкції водосховищ; розробити пропозиції щодо природоохоронних заходів. Комплексна еколого-гідрологічна оцінка дозволила визначити оптимальні варіанти реконструкції МГЕС із мінімальним негативним впливом на довкілля.. Проведений аналіз дозволив визначити найбільш проблемні ділянки водосховищ (з урахуванням інтенсивності берегових процесів), що потребують детального вивчення.

Для дослідження використано дані багаторічних спостережень гідрометеорологічної, геологічної, екологічної служб України, а також матеріали проектної документації та результати польових досліджень.

## III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Історично, розвиток малої гідроенергетики в Україні розпочався у 20-х роках ХХ століття. Однак, з розвитком великих теплових та атомних електростанцій у другій половині ХХ століття, інтерес до малих ГЕС суттєво знизився. Проте, зростаюча зацікавленість у відновлюваних джерелах енергії та подорожчання традиційних енергоносіїв стимулювали відродження малих гідроелектростанцій в Україні наприкінці ХХ – на початку ХХІ століття. Аналіз існуючих гідротехнічних споруд свідчить про їхній потенціал для відновлення та модернізації.

Адміністративно, Сутиське водосховище розташоване на території Тиврівського, Жмеринського та Вінницького районів, Брацлавське – у Немирівському, а Чернятське – в Бершадському. Характеристики водосховищ наведено в таблиці.

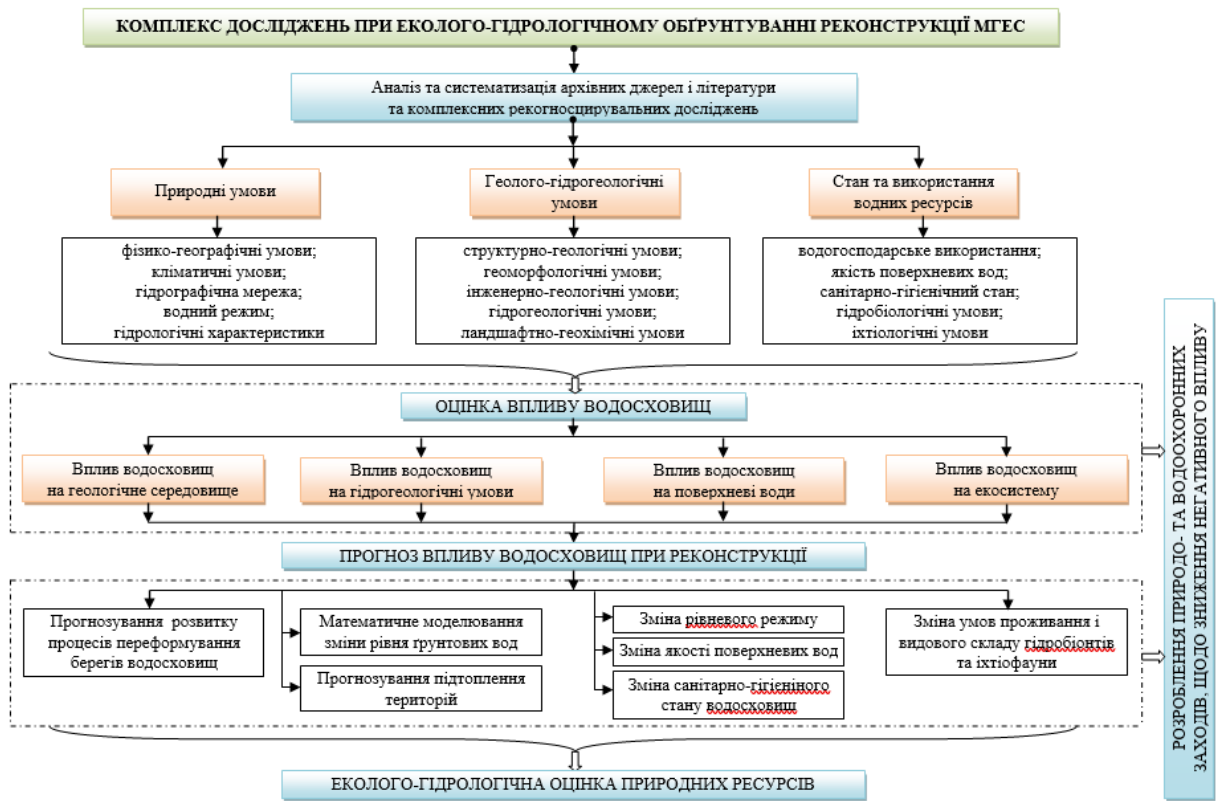


Рисунок. Блок-схема гідрологічних і гідроекологічних досліджень при обґрунтуванні реконструкції МГЕС на р. Південний Буг

Таблиця

Основні параметри Сутиського, Брацлавського та Чернятського водосховищ [1]

Показники		Один-иці виміру	Водосховища			
			Сутиське	Брацлавське	Чернятське	
Рівні (горизонти)	НПР	м	228,1	188,55	137,5	
	РМО	м	224,1	185,50	134,0	
	ФПР (0,1%)	м	230,0	190,95	140,75	
	рівень спрацювання водосховища	м	227,5	188,5	137,2	
Об'єм	повний	млн.м <sup>3</sup>	8,51	3,30	3,30	
	корисний	млн.м <sup>3</sup>	1,81	0,22	3,0	
Морфометричні показники	відстань від гирла річки	м	538	458	346	
	довжина водосховищ	км	30	16	10	
	ширина	максимальна	км	0,17	0,21	0,2
		середня	км	0,12	0,18	0,14
	глибина	максимальна	м	6,20	4,50	6,25
		середня	м	2,30	3,10	2,30
площа водного дзеркала при НПР		км <sup>2</sup>	3,77	1,10	1,40	

Басейн річки Південний Буг у районі розташування досліджуваних водосховищ охоплює частини Подільської та Придніпровської височин. Регіон відноситься до лісостепової зони з помірно хвилястим рельєфом, що характеризується відносними висотами 20-40 метрів. Така морфологія сприяє формуванню стійких інженерно-геологічних умов та обмежує розвиток екзогенних процесів.

Інженерно-геологічні умови території демонструють високий ступінь однорідності та стабільності водно-фізичних та фізико-механічних властивостей гірських порід. Це призводить до обмеженого прояву екзогенних геологічних

процесів, які, переважно природного походження, перебувають у стадії стабілізації.

У геоструктурному відношенні територія дослідження приурочена до південно-західної частини Українського щита та його перехідної зони до Причорноморської западини. Геоморфологічно вона відповідає Придніпровській височині.

Активний розвиток екзогенних процесів, таких як яружна ерозія та глибока річкова ерозія, що досягає кристалічних порід, привів до формування каньйоноподібних долин. Ці геоморфологічні особливості, створили сприятливі умови для

будівництва водосховищ на р. Південний Буг та її притоках [6].

Проведене дослідження охопило широкий спектр характеристик гідрологічного режиму річки Південний Буг, включаючи оцінку водного, рівневого, льодового режимів, аналіз річного стоку, визначення запасів водних ресурсів та екстремальних гідрологічних характеристик [7].

Для оцінки ефективності екологічного водокористування на річці Південний Буг було застосовано комплексний підхід, що включав аналіз антропогенного навантаження на водні ресурси (за даними про обсяги безповоротного забору води та скиду забруднених стічних вод) та оцінку екологічного стану водної екосистеми за якістю поверхневих вод [6].

Для оцінки екологічного стану води річки Південний Буг було використано систему класифікації нормативів якості поверхневих вод України [3]. Аналіз проводився за даними 21 гідроекологічного посту, розташованих на ділянці від міста Вінниці до села Маньківка. Дослідження охопило три блоки показників: сольовий склад, трофо-сапробіологічні (еколого-санітарні) характеристики та вміст специфічних токсичних речовин. Оцінка здійснювалася як для окремих ділянок водосховищ (Сутиського, Брацлавського, Чернятського), так і для кожного водосховища в цілому, а також для приток [9]. Крім того, проведено комплексну оцінку за санітарно-хімічними та санітарно-мікробіологічними показниками.

Якість водних ресурсів річки Південний Буг значною мірою залежить від господарської діяльності у басейні річки. Загальний обсяг забору води становить 2,518 млн. м<sup>3</sup>, з яких більша частина (52,7%) добувається з підземних джерел. Головними споживачами води є комунальне господарство (33%), промисловість (39%) та сільське господарство (27%). Значна частина стічних вод (52%) скидається безпосередньо у поверхневі водойми, що призводить до забруднення води органічними речовинами, зваженими частинками, солями та сполуками азоту. Високі втрати води під час водокористування характерні для Сутиського (82%), Брацлавського (50%) та Чернятського (30%) водосховищ.

Результати дослідження якості води в об'єктах та їх притоках показали, що більшість показників відповідають вимогам до води II-III класу чистоти, що характеризується як "добра" або "задовільна". Однак, проведене оцінювання екосистем виявило, що лише у 48% випадків стан водних екосистем можна вважати «добрим». У 19% випадків спостерігається тенденція до погіршення стану через збіднення видового складу та спрощення структури угруповань. В той же час, у 33% випадків стан екосистем оцінюється як «задовільний», що свідчить про порушення природних зв'язків та дисбаланс у функціонуванні водних екосистем. Санітарно-гігієнічна оцінка води у водосховищах визначила її стан як

задовільний.

Для оцінки екологічного стану водосховищ було проведено гідробіологічне дослідження, яке включало аналіз видового складу, чисельності та біомаси гідробіонтів, а також встановлення зв'язку між їхнім розвитком і якістю води. Крім того, оцінювалася рибопродуктивність водосховищ [8].

Аналіз антропогенного впливу на досліджувану територію свідчить про помірний рівень техногенного навантаження, в тому числі на водні об'єкти. Це створює передумови для реалізації нових екологічно орієнтованих проєктів.

З метою оцінки впливу підйому рівня води на процеси берегової ерозії було застосовано метод натурної аналогії. На репрезентативних ділянках з різними інженерно-геологічними умовами проводилися детальні польові дослідження, результати яких в подальшому узагальнювалися для розробки прогнозних моделей зміни берегової лінії всього водосховища.

З метою оцінки динаміки берегової лінії та визначення зон затоплення територій у зоні впливу Сутиського, Брацлавського та Чернятського водосховищ було здійснено комплексне гідроморфологічне та геодинамічне районування акваторій. На кожному водосховищі були виділені репрезентативні ділянки, що характеризуються різними типами берегів (нижня пригреблева, середня проміжна, верхня вклинювання підпору та річкова). Для кожної ділянки було побудовано поперечні профілі, що дозволило детально дослідити морфологію берегів та геологічну будову прибережної зони [6].

Дослідження показали, що основними факторами переформування берегів річки Південний Буг є ерозійно-аккумулятивні процеси в русловій частині, а також гравітаційно-денудаційні процеси на схилах заплави, терас та прилеглих плато. У старицях та плесах водосховищ переважають процеси заболочування, заростання вищою водною рослинністю та акумуляція мулових відкладів [7].

Головним чинником, що обумовлюватиме зміни екологічного стану досліджуваної території, зокрема геологічного середовища, є антропогенне порушення гідрологічного режиму, пов'язане з додатковим підпором водосховищ на 1 метр. Обрана величина підпору відповідає середньому багаторічному підйому рівня ґрунтових вод у період повеней.

З метою оцінки ризиків, пов'язаних з підвищенням рівня води у водосховищах, було проведено чисельне моделювання динаміки рівня ґрунтових вод та оцінку площ підтоплення територій, що прилягають до Сутиського, Брацлавського та Чернятського водосховищ. Результати моделювання дозволяють визначити оптимальні значення глибини залягання ґрунтових вод для різних видів землекористування та оцінити потенційні збитки від підтоплення територій. Дослідження впливу підвищення рівня води у

водосховищах на підтоплення прилеглих територій показало, що при збільшенні рівня ґрунтових вод на 1,0 м, 1,5 м, 2,0 м та 2,5 м відповідно, значно зростають площі підтоплення сільськогосподарських угідь, населених пунктів та інших територій. Для оцінки масштабів підтоплення було проведено детальний аналіз довжини зон підтоплення вздовж берегової лінії водосховищ.

В результаті математичного моделювання встановлено, що підвищення рівня води у водосховищах на один метр призводить до різних наслідків для режиму ґрунтових вод. На ділянках з крутими берегами вплив є незначним і обмежується зоною шириною до 100 метрів. Однак, на заплавах територіях, де рівень ґрунтових вод розташований близько до поверхні, підтоплення поширюється на значно більшу відстань – до 300-400 метрів. При цьому, через неоднорідність рельєфу заплав, картина підтоплення є досить складною: спостерігається чергування зон з підвищеним і пониженим рівнем ґрунтових вод.

Проведені дослідження показали, що заплановане підвищення рівня води на 1,0 м у Сутиському, Брацлавському та Черняцькому водосховищах не призведе до значних змін їх гідрологічного режиму. Очікується, що новий рівень води у водосховищах відповідатиме максимальним рівням води річки Південний Буг, які перевищуються не частіше ніж один раз на 20 років. Внаслідок такого підвищення рівня води буде затоплено заплавні території, на яких сьогодні розташовані сільськогосподарські угіддя та інші об'єкти господарювання (рис. 2).

Аналіз умов та факторів, що впливають на зміни берегів водосховищ, дозволив спрогнозувати їх майбутній стан. Найбільш суттєвими процесами, які формують береги річки Південний Буг, є: ерозія та акумуляція матеріалу в руслі, зсуви та обвали на схилах, а також заболочування та замулення в затоках. Зміна нормального підпірного рівня (НПР) у водосховищах призведе до активізації цих процесів, але через 10-15 років вони стабілізуються. При цьому, зміни торкнуться приблизно 20-30% довжини берегів, а максимальна відстань переміщення берегової лінії не перевищить 20 м.

З метою мінімізації екологічних ризиків, пов'язаних з реконструкцією малих ГЕС, передбачено комплекс природоохоронних заходів. Для захисту берегової лінії та запобігання ерозії заплановано проведення біоінженерних робіт: залуження і створення лісонасаджень на прибережних захисних смугах, особливо в зонах, прилеглих до населених пунктів та господарських об'єктів. Для збереження біорізноманіття водних екосистем передбачено встановити водоохоронні зони та прибережних захисних смуг, а також вжити заходів щодо відновлення природних нерестовищ цінних видів риби. Крім того, для регулювання трофічних зв'язків у водосховищі та

запобігання евтрофікації пропонується проведення біологічної меліорації шляхом зарибнення рослинними видами риби.

## ВИСНОВКИ

Дослідження гідрологічних та екологічних аспектів реконструкції малих ГЕС є актуальним завданням, оскільки дозволяє забезпечити збалансований розвиток енергетики та збереження природних ресурсів. Проведені дослідження показали, що реконструкція малих ГЕС може мати значний вплив на водні екосистеми. Для мінімізації негативних наслідків необхідно вживати комплекс заходів, таких як створення прибережних захисних смуг, відновлення нерестовищ та біологічна меліорація водосховищ. Отримані результати можуть бути використані для розробки ефективних природоохоронних заходів та оптимізації процесу реконструкції малих ГЕС.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Басюк Т. О. Гідрологічний режим водосховищ гідроенергетичного призначення на р.Південний Буг. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування*. Збірник наукових праць. Частина 1. Випуск 3 (47). Рівне 2009. С. 243-250.
- [2] Екологічні основи управління водними ресурсами : навч. посіб. / А.І. Томільцева, А.В. Яцик, В.Б. Мокін та ін. – К. : Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 200 с.
- [3] Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. К.: СИМВОЛ-Т, 1998. С.28.
- [4] Ободовський О., Кривець О. Аналітичний огляд та перспективи досліджень у галузі малої гідроенергетики та гідроенергетичного потенціалу річок України. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка. Серія: Геологія*. 2023. № 1(100). С. 124-133.
- [5] Принципи збалансованого розвитку гідроенергетики : Аналітичний документ / Г. К. Веремійчик, Р. Б. Гаврилюк, та ін. Київ : Видавництво «Фенікс», 2018. 20 с
- [6] Яцик А. В., Басюк Т. О. Оцінка екологічної ефективності водогосподарського використання водосховищ гідроенергетичного призначення р.Південний Буг. *Водне господарство України*. – 2009. – № 6. – С. 20– 21.
- [7] Яцик А. В., Басюк Т. О. Оцінка і прогнозування розвитку процесів переформування берегів Сутиського водосховища на р.Південний Буг за умови підвищення рівнів води. *Водне господарство України*. 2010. № 4. С. 30–36.
- [8] Яцик А. В., Чернявська А. П., Басюк Т. О. Оцінка екологічного стану водосховищ гідроенергетичного призначення на р.Південний Буг за гідробіологічними показниками. *Гідроенергетика України*. 2010. № 3. С. 17–24.
- [9] Яцик А. В., Чернявська А. П., Гопчак І. В., Басюк Т. О. Формування якості води у водосховищах малих ГЕС на р.Південний Буг. *Водне господарство України*. 2010. № 5. С. 15 - 21 с.
- [10] Яцик А.В., Стичаковська Т. О. Мала гідроенергетика України: стан, соціально-економічні аспекти розвитку, вплив на природне середовище. *Водне господарство*. 2008. № 6. С. 11-15.



# Аналіз взаємодії сонячної електростанції для підвищення ефективності роботи Дністровської ГАЕС

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.019>

Олександр Богуш

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

**Анотація** – Задля оптимізації витрат на електроенергію і зменшення залежності від зовнішніх джерел електроенергії запропоновано встановлення СЕС на верхньому водосховищі Дністровської ГАЕС. Такий підхід дозволить суттєво зекономити енергію мережі та може стати прикладом для інших енергетичних проєктів як в Україні, так і закордоном. Реалізація СЕС на верхньому водосховищі Дністровської ГАЕС – дозволить створити інтеграцію генерації СЕС із системами управління і зберігання енергії на ГАЕС, сприятиме зменшенню вуглецевого сліду та відкриє додаткові можливості для інвестицій.

**Ключові слова** – гідроагрегат; водосховище; фотоелектричний модуль; ефективність роботи; СЕС; ГАЕС.

## I. ВСТУП

Однією з найбільш оптимізованих і енергоефективних електростанцій у світі є ГАЕС. На сьогодні в Україні є чотири ГАЕС. Найбільша в Україні та одна з найбільших в Європі – Дністровська ГАЕС[5]. У своїй роботі вона використовує перепади води між двома водосховищами задля виробництва електроенергії у години пікового навантаження. Вода під час низького попиту споживання перекачується насосами з нижнього водосховища у верхній, а під час пікового навантаження – скидається через турбіни, генеруючи електроенергію. Такий цикл забезпечує стабільну роботу енергосистеми. Однак світові екологічні тенденції стрімко набирають обертів та виникає потреба ще більше збалансувати витрати енергії ГАЕС.

За розрахунками проєктних показників Дністровської ГАЕС станція складатиметься із семи оборотних гідроагрегатів по 324/421 МВт кожний. Загальна потужність становитиме 2268 МВт у генераторному режимі та 2947 МВт – у насосному, що виводить її на перше місце у Європі та на шосте у світі [3]. Це цінні балансуєчі та маневруєчі потужності, які необхідні ОЕС України у процесі інтеграції до європейської енергосистеми «ENTSO-E».

Таким чином гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС) залишаються одними з найважливіших компонентів енергетичної системи, оскільки дозволяють балансувати попит та пропозицію

електроенергії, зберігати її надлишок та компенсувати коливання у виробництві відновлюваних джерел. Дністровська ГАЕС є одним із ключових об'єктів в енергетичній системі України. Однак в умовах переходу до більш сталої енергетики важливо розглянути можливості підвищення її ефективності за рахунок використання альтернативних джерел енергії, таких як сонячні електростанції.

Сонячні електростанції (СЕС) розглядаються як одна з найбільш перспективних альтернатив для доповнення роботи ГАЕС. В умовах великого площевого розташування ГАЕС, включаючи резервуари, можна встановити сонячні панелі для підвищення виробництва електроенергії у періоди пікової сонячної активності.

Мета – об'єднати СЕС і ГАЕС. Сонячна електростанція може виробляти електроенергію вдень, це дозволить оптимізувати роботу ГАЕС у нічний час. Завдяки цьому зменшується залежність від зовнішніх джерел енергії: інтеграція СЕС може знизити потребу в зовнішніх джерелах електроенергії для живлення насосів ГАЕС, (особливо під час перекачування води в денний час), що збільшить загальну енергоефективність усього комплексу ГАЕС. Завдяки такому балансу підвищується енергетична стабільність. За рахунок поєднання гідроакumuлюючих можливостей і сонячної генерації Дністровська ГАЕС може стати більш гнучкою і стабільною у реагуванні на зміни попиту електроенергії. Це у свою чергу може підтримати тенденцію поширення відновлювальних джерел енергії та сталого розвитку, привабити значні світові інвестиції.

## II. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є Дністровська ГАЕС з загальною проєктною потужністю семи агрегатів 2268 МВт у генераторному режимі та 2947 МВт у насосному. Потужність одного агрегату відповідно 324/421 МВт. Річний виробіток електроенергії з тривалістю роботи 4 години на добу одного агрегату 446,66 млн. кВт-год. Річні витрати електроенергії на заряд ГАЕС з тривалістю роботи 4,2 години на добу одного агрегату 587,66 млн. кВт-год [1].

Площа верхньої водойми – 2 550 000 м<sup>2</sup>.

Розглядається випадок можливості встановити плавучі конструкції під фотоелектричні модулі на поверхні верхнього водосховища Дністровської ГАЕС. Це рішення дозволить не тільки генерувати чисту відновлювану електроенергію, але й зменшити випаровування води з поверхні. Такі конструкції передбачають розміщення сонячних панелей на спеціально встановленому плаваючому баласті з поліетилену високої щільності. Крім того, кронштейни мають мати високу корозійну стійкість при умові збереження міцності, що буде підтримувати обладнання у робочому стані протягом тривалого часу [2,4].

Самі фотоелектричні модулі мають мати ступінь захисту IP 68, тобто повний захист від пилу та герметичність при зануренні у воду на глибину до 1,5 метра до 30 хвилин. Цим вимогам відповідають більшість виробників фотоелектричних модулів. Таким чином, розглядається використання фотоелектричних модулів Longi Solar LR5-72НТН 580Wt піковою потужністю 0,58 кВт. Моделювання генерації СЕС здійснювалося з використанням програми Smart Design 2.0.

### III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для аналізу було обрано варіант роботи сонячної електростанції, як допоміжного джерела живлення до вже існуючої мережі. Оскільки це є більше економічно доцільним ніж встановлення дороговартісного акумулятора-накопичувача, який забезпечить стабільність живлення для гідроагрегатів. З розрахунку корисної площі дзеркала водосховища і площі ФЕМ було здійснено розрахунок кількості і потужності системи СЕС.

Для досягнення максимальної потужності з 1 м<sup>2</sup> площі ми вибрали сонячні панелі n-типу фірми виробника Longi Solar LR5 -72НТН, потужністю 580 Вт, що дозволить отримати загальну потужність сонячного масиву фотомодулів 279 МВт/год. Також з розрахунків у програмному забезпеченні Smart Design 1.0 ми отримуємо і показники річної генерації СЕС на 294,12 млн. кВт-год.

Проаналізувавши отримані дані ми дійшли висновку, що дану потужність масиву фотомодулів, теоретично можна розмістити на поверхні верхнього водосховища Дністровської ГАЕС. Цього буде достатньо, щоб покрити 7,15% річних витрат електроенергії у насосному режимі при досягненні проектної потужності ГАЕС, 12,51 % річних витрат електроенергії у насосному режимі при існуючій потужності 4 агрегатів ГАЕС, або 50,05% річних витрат електроенергії у насосному режимі 1 агрегату ГАЕС.

### IV. ВИСНОВКИ

Інтеграція сонячної електростанції у комплекс Дністровської ГАЕС має низку економічних та екологічних переваг. По-перше, це зниження операційних витрат. Використання сонячної енергії

для забезпечення роботи насосів ГАЕС може зменшити споживання електроенергії з зовнішніх джерел, знизивши експлуатаційні витрати. По-друге, це зменшення вуглецевого сліду. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як СЕС, дозволить зменшити викиди вуглекислого газу та зробити енергосистему більш екологічною. По-третє, це додаткові можливості для інвестицій. Модернізація станції із впровадженням СЕС може залучити додаткові інвестиції у відновлювані джерела енергії. По-четверте, це можливість інфраструктурної інтеграції. Є можливість створити інфраструктуру для поєднання генерації СЕС із системами управління і зберігання енергії на ГАЕС. Це забезпечить гнучкість у використанні обох джерел енергії. По-п'яте, це оптимізація балансування енергосистеми. Інтегровані алгоритми управління потоками енергії з ГАЕС і СЕС дозволять краще прогнозувати пікові навантаження і відповідно регулювати генерацію.

Отже, такий інноваційний підхід до використання відновлюваних джерел енергії у поєднанні з існуючими гідроакумулюючими технологіями може стати прикладом для інших енергетичних проектів як в Україні, так і закордоном. Проте для того, щоб повністю забезпечити Дністровську ГАЕС енергією для перекачування води за рахунок сонячних електростанцій, потрібно встановити набагато потужнішу СЕС. З огляду на це покриття всієї потреби за допомогою СЕС не є доцільним без оптимізації та поєднання з іншими джерелами енергії. Зате, інтеграція СЕС як додаткового джерела енергії може значно зменшити використання традиційних джерел енергії, але для повного покриття потреби в енергії для перекачування знадобиться колосальна площа для встановлення панелей. Найоптимальніший варіант – часткова інтеграція СЕС.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Сук С. П. СУЧАСНІ ВИМОГИ З ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Випуск 2(62) 2013 р. Серія «Технічні науки»
- [2] Floating Solar Panels Market [Online] Available: <https://avenston.com/articles/floating-solar-farms/>
- [3] Дністровська ГАЕС: грандіозне будівництво для сталого енергетичного майбутнього [Online] Available: [https://uhe.gov.ua/media\\_tsentr/novyny/dnistrovska-gaes-grandiozne-budivnictvo-dlya-stalogo-energetichnogo-maybutnogo](https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/dnistrovska-gaes-grandiozne-budivnictvo-dlya-stalogo-energetichnogo-maybutnogo)
- [4] Floating Solar Panels Systemi [Online] Available: <https://ua.dsissolar.com/info/floating-solar-panels-67048937.html>
- [5] Гідроенергетика є найбільшим джерелом відновлюваної енергії у світі [Online] Available: [https://uhe.gov.ua/media\\_tsentr/novyny/hydroenerhetyka-ye-naybilshym-dzherelom-vidnovlyuvanoyi-enerhiyi-u-sviti](https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/hydroenerhetyka-ye-naybilshym-dzherelom-vidnovlyuvanoyi-enerhiyi-u-sviti)

# Оцінювання точності вузла обліку електроенергії при зниженому струмі навантаження

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.020>

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 метод та розроблено програму EMRL для оцінювання дійсного споживання електроенергії та найбільш можливого недообліку за показами лічильника у складі вузла обліку в разі зниженого струму навантаження. Оцінювання здійснюється нечітким числом при граничному рівні довіри. Адекватність програми підтверджено шляхом аналізу даних споживання електроенергії промисловим підприємством. Застосування EMRL дасть змогу знизити збитки енергопостачальних компаній за рахунок підвищення точності обліку електроенергії.

**Ключові слова** – електроенергія; облік; невизначеність вимірювання; струм навантаження; нечіткий інтервал

## I. АКТУАЛЬНІСТЬ ПИТАННЯ

Завдяки плану REPowerEU Європейський Союз рухається до зниження використання викопного палива, в той же час – ширшого застосування електричної енергії. Протягом 2020–2030 років передбачається інвестувати у розвиток електроенергетичної інфраструктури 584 млрд євро, в тому числі 170 млрд – у цифровізацію мереж. Однією з основних складових Європейського енергетичного простору даних є інтелектуальний облік електроенергії. Прогнозний обсяг ринку розумних лічильників за 2024 рік становить 13,5 млрд доларів США [1]. В країнах ЄС наразі експлуатується близько 200 млн. таких приладів. Сфера використання вузлів обліку електроенергії включає побутових та промислових споживачів, потужності розподіленої генерації, накопичувачі, зарядні станції електромобілів тощо.

Основним недоліком вузлів обліку, що включають лічильник електроенергії та електромагнітні вимірювальні трансформатори струму, є підвищення невизначеності вимірювання в ненормованих режимах. Зокрема, це стосується

режиму зниженого струму через вузол обліку, що має місце під час перерв в роботі основного обладнання підприємств, зниженні генерації сонячної електростанції тощо. Такі втрати електроенергії становлять основну частину нетехнологічних втрат [2].

Відомо способи оцінювання нетехнологічних втрат електроенергії з використанням нейромереж та машинного навчання [3], глибокої згорткової нейронної мережі [4], контрастного прогнозного кодування. До недоліків таких методів відноситься складна технічна реалізація, необхідність навчання за великими масивами даних, підвищена імовірність помилок при зміні режиму споживання.

На основі аналізу літературних джерел можна встановити, що на сьогодні існує проблема низької точності обліку електроенергії при зниженому струмі навантаження. Споживання необлікованої енергії підвищує економічні збитки постачальників.

Мета – підвищення точності вузла обліку електроенергії при зниженому струмі навантаження в розподільчих електромережах напругою 0,38 кВ.

## II. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження – трифазний вузол обліку електроенергії. Предмет – невизначеність вимірювання електроенергії. Прийняті припущення: струми фаз є реалізаціями випадкового стаціонарного процесу; напруги фаз не виходять за межі допустимого за ДСТУ EN 50160:2023 діапазону; навантаження носить активний характер; потужність передається від джерела навантаженню.

Значення параметрів статичних характеристик  $\hat{I}_s^*(I^*)$  вимірювальних трансформаторів струму оцінюються відповідно до методу [5]. Нечіткий інтервал приналежності відносної похибки обліку електроенергії оцінюється згідно з методом [6]:

$$\widehat{\delta W}(I_A, I_B, I_C) = \left[ \frac{\sum_{\zeta} I_{\zeta} \cdot \delta W_{L\zeta}(I_{\zeta})|_{\lambda_b^*}}{\sum_{\zeta} I_{\zeta}}; \frac{\sum_{\zeta} I_{\zeta} \cdot \delta W_{R\zeta}(I_{\zeta})|_{\lambda_b^*}}{\sum_{\zeta} I_{\zeta}} \right], \quad (12)$$

де  $\lambda_b^*$  – граничний рівень довіри.

Методи реалізовано як комп'ютерну програму EMRL, рис. 1, що автоматично аналізує покази лічильника та оцінює дійсне споживання і найбільш можливий недооблік.

Num	Start date and time	End date and time	Duration of reduced load	Consumption according to readings, kWh	Estimation of real consumption, kWh	The most possible underaccounting, kWh
2868	30.09.2020 20:45:00	30.09.2020 21:00:00	00:15:00	0,720	0,731	0,011
2869	30.09.2020 21:00:00	30.09.2020 21:15:00	00:15:00	0,720	0,730	0,010
2870	30.09.2020 21:15:00	30.09.2020 21:30:00	00:15:00	0,720	0,731	0,011
2871	30.09.2020 21:30:00	30.09.2020 21:45:00	00:15:00	0,720	0,731	0,011
2872	30.09.2020 21:45:00	30.09.2020 22:00:00	00:15:00	0,720	0,730	0,010
2873	30.09.2020 22:00:00	30.09.2020 22:15:00	00:15:00	0,440	0,448	0,008
2874	30.09.2020 22:15:00	30.09.2020 22:30:00	00:15:00	0,040	0,080	0,040
2875	30.09.2020 22:30:00	30.09.2020 22:45:00	00:15:00	0,040	0,056	0,016
2876	30.09.2020 22:45:00	30.09.2020 23:00:00	00:15:00	0,080	0,083	0,003
2877	30.09.2020 23:00:00	30.09.2020 23:15:00	00:15:00	0,120	0,124	0,004
2878	30.09.2020 23:15:00	30.09.2020 23:30:00	00:15:00	0,080	0,083	0,003
2879	30.09.2020 23:30:00	30.09.2020 23:45:00	00:15:00	0,200	0,204	0,004
2880	30.09.2020 23:45:00	30.09.2020 23:59:00	00:14:00	0,280	0,286	0,006
Per Day				25,640	26,982	1,342
TOTAL:				581,200	612,935	31,735

Рис. 1. Комп'ютерна програма EMRL

Для оцінювання адекватності комп'ютерної програми використано результати експерименту для приватного підприємства, що проведений у співпраці з ПрАТ «Рівнеобленерго» [7].

### III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Реальне споживання та оцінювання найбільш можливого недообліку електроенергії, підсумовані за 5-добові інтервали, ілюструє табл. I. В розрізі щодобового споживання найбільшою частотою характеризуються відносні похибки оцінювання електроенергії програмою EMRL в діапазоні 0–2 %.

ТАБЛИЦЯ I. РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ СПОЖИВАННЯ ЗА 5-ДОВОБІ ІНТЕРВАЛИ

Дати, 09.2020	Покази вузла обліку, кВт·год	Оцінка EMRL, кВт·год	Споживання дійсне, кВт·год	Оцінка недообліку EMRL	
				Δ, кВт·год	δ, %
01–05	123,040	126,117	125,706	3,077	2,4
06–10	108,000	112,029	111,381	4,029	3,6
11–15	91,160	96,895	95,725	5,735	5,9
16–20	88,160	92,957	94,664	4,797	5,2
21–25	87,800	94,679	94,216	6,879	7,3
26–30	83,040	90,258	90,007	7,218	8,0
Σ	581,200	612,935	611,699	31,735	5,2

За кожні 5 днів оцінений найбільший недооблік знаходиться в діапазоні від 2,4 % до 8,0 %. При цьому відхилення оцінки споживання енергії від дійсного споживання було меншим від 1,8 %.

Оцінка EMRL місячного споживання відрізняється від дійсної величини на 0,2 %.

Застосування програми EMRL дасть змогу знизити збитки енергопостачальних компаній за рахунок підвищення точності обліку. До недоліків програми слід віднести обмеження області застосування вузлами обліку з електромагнітними трансформаторами струму.

### IV. ВИСНОВКИ ТА НАПРЯМОК ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті аналізу місячних даних споживання електроенергії реальним об'єктом встановлено, що недооблік становить 5,2 %. Має місце зниження рівня недообліку при підвищенні величин струмів фаз. При споживанні до 10 кВт·год за добу може бути необліковано до 18 % енергії. Якщо споживання перевищує 20 кВт·год, недооблік є меншим від 6 %. Причина – нелінійний характер метрологічних характеристик вузла обліку при знижених струмах. Відносна похибка оцінювання дійсної величини спожитої електроенергії програмою EMRL з імовірністю 0,7 не перевищує 2%. Результати EMRL адекватні емпіричним даним при рівні значущості 0,05. В ході подальших досліджень доцільно інтегрувати розроблену програму з існуючими системами комерційного обліку електроенергії.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Statista Research Department. (2024). Smart electricity meter market value worldwide 2020-2027. URL: <https://www.statista.com/statistics/1304126/global-smart-electricity-meter-market-value/>
- [2] Carr, D., Thomson, M. (2022). Non-technical electricity losses. *Energies*, 15(6), 2218. doi: <https://doi.org/10.3390/en15062218>
- [3] Yadav, R., Kumar, Y. (2021). Detection of non-technical losses in electric distribution network by applying machine learning and feature engineering. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 54(3), 487–493. doi: <https://doi.org/10.18280/jesa.540312>
- [4] Haq, E.U., Pei, C., Zhang, R., Jianjun, H., Ahmad, F. (2023). Electricity-theft detection for smart grid security using smart meter data: A deep-CNN based approach. *Energy Reports*, 9(1), 634-643. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.072>
- [5] Vasylets, K., Kvasnikov, V., Vasylets, S. (2022). Determining the static characteristic of a measuring current transformer at a reduced load of the metering unit. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (8 (119)), 13–20. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265068>
- [6] Vasylets, K., Kvasnikov, V., Vasylets, S. (2022). Refinement of the mathematical model of electrical energy measurement uncertainty in reduced load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (118)), 6–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262260>
- [7] Древецький, В.В., Василець, С.В., Ахромкін, А.О., Василець, К.С. (2020). Вимірювання та облік електричної енергії із застосуванням вимірювальних трансформаторів струму в умовах зниженого навантаження. Національний університет водного господарства та природокористування. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/25021/>



# Підходи до інтеграції нейронних мереж у MATLAB для задач моделювання теплонасосних установок

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.021>

Володимир Волощук

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського"  
Київ, Україна  
[Vl.Volodya@gmail.com](mailto:Vl.Volodya@gmail.com)

Микола Богза

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського"  
Київ, Україна  
[n.bohza@gmail.com](mailto:n.bohza@gmail.com)

**Анотація** – У статті розглянуто інтеграцію нейронних мереж для моделювання теплонасосних установок у MATLAB Simulink. Використано модель LSTM для прогнозування параметрів роботи ТНУ. Порівняно методи інтеграції через S-функції та DLL, що забезпечило високу швидкість і точність моделювання.

**Ключові слова**— нейронні мережі, LSTM, ТНУ, MATLAB Simulink, S-функція, DLL.

## I. ВСТУП

Аналіз представлених статей показує, що різні підходи до моделювання теплових насосів за допомогою нейронних мереж у MATLAB Simulink мають спільну мету — підвищити точність та ефективність прогнозування енергоспоживання і продуктивності систем. У дослідженні [1] основний акцент зроблено на використанні багатопередового перцептрона (MLP) для моделювання параметрів теплонасосної установки з холодоагентом R134a, що забезпечило високу точність прогнозування коефіцієнта корисної дії (COP). Стаття [2] розширює цей підхід на систему теплових насосів на базі ґрунтових джерел тепла (GSHP), використовуючи модель NARX, яка показала найкращі результати серед розглянутих підходів, підтверджуючи переваги нейронних мереж для складних систем.

Інші дослідження також фокусуються на використанні нейронних мереж для точного моделювання енергоспоживання та продуктивності охолоджувальних систем. У статтях [3], [4] і [5] описані успішні приклади застосування нейронних мереж для прогнозування параметрів роботи компресорів у системах охолодження на основі CO<sub>2</sub>. Особливо варто зазначити, що в обох дослідженнях використано алгоритм Adam для навчання моделей, що дозволило досягти високої точності та ефективності. Спільною рисою цих досліджень є інтеграція моделей у Simulink для оптимізації управління реальними системами, що демонструє високий потенціал нейронних мереж у покращенні енергоефективності.

Необхідність швидкого та точного моделювання теплонасосних установок (ТНУ) стає особливо актуальною на фоні підвищеного попиту на системи відновлюваної енергетики. Інтеграція нейронних мереж у середовище MATLAB Simulink дозволяє вирішити ці завдання завдяки точному прогнозуванню та ефективному управлінню динамічними системами.

Мета роботи — запропонувати методи та засоби інтеграції нейронних моделей у MATLAB для дослідження роботи ТНУ та проаналізувати їх ефективність. Особливу увагу буде приділено порівнянню точності та швидкості обчислень різних моделей.

## II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Теплонасосні установки (ТНУ) відіграють важливу роль у сучасних системах відновлювальної енергетики, забезпечуючи ефективне використання енергії системами теплозабезпечення. Сучасні дослідження вказують на необхідність оптимізації роботи ТНУ з метою підвищення їхньої продуктивності та зниження енергоспоживання. Для досягнення цієї мети ключовим аспектом є точне моделювання динамічних процесів у ТНУ, яке дозволяє прогнозувати їхню роботу в різних умовах. Нейронні мережі, завдяки своїй здатності швидко обробляти нелінійні процеси, стають ефективним інструментом для таких завдань, особливо при інтеграції їх у середовище MATLAB Simulink.

У процесі розробки нейронної моделі для теплового насоса було використано Python та бібліотеку TensorFlow. Основне завдання полягало в тому, щоб створити модель, здатну прогнозувати роботу теплового насоса в умовах змінних теплових навантажень. Для цього було обрано рекурентну нейронну мережу на основі LSTM (Long Short-Term Memory), оскільки вона ефективно обробляє послідовні дані та враховує залежності між історичними значеннями.

Модель була створена з використанням п'яти попередніх значень основних параметрів теплового насоса, таких як температури на виході та вході конденсатора, а також масова витрата теплоносія.

Для оптимізації процесу навчання використовувався алгоритм Adam, а функцією втрат було обрано середньоквадратичну помилку (MSE), що дозволяє мінімізувати різницю між прогнозованими та фактичними значеннями. Після проведення процесу тренування модель показала високі результати точності прогнозування, що підтверджує її ефективність для моделювання складних динамічних систем, таких як теплові насоси[6, 7, 8]

Важливим етапом була конвертація отриманої моделі на мову C за допомогою бібліотеки keras2c. Цей інструмент дозволяє перетворити модель TensorFlow у код на мові C, який може бути інтегрований у MATLAB та Simulink. Конвертація включала створення трьох основних C-файлів: для обробки шарів нейронної мережі, для виконання передбачень та для ініціалізації параметрів[9].

Наступний етап включав два шляхи інтеграції отриманої моделі в середовище MATLAB. Перший шлях передбачав компіляцію цього коду як DLL-бібліотеки для використання у .m-файлах MATLAB(зображено на рис. 1). Це дало можливість викликати модель з MATLAB-сценаріїв для подальших обчислень та аналізу даних. DLL-бібліотека забезпечила просту інтеграцію та швидке виконання обчислень у MATLAB, дозволяючи автоматизувати процеси моделювання без необхідності перетворення коду вручну.

```

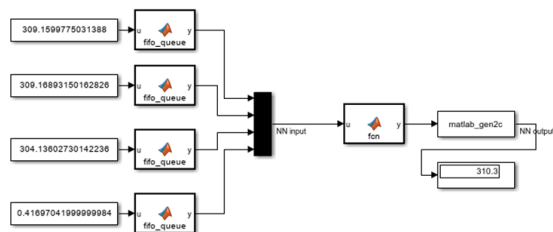
% Завантажуємо бібліотеку
loadlibrary(dllPath, headerPath);

T_CD_c_out_setpoint = single([309.1652951031354, 309.1639657031362, 309.162636303137
T_CD_cond_c_out = single([309.17425150162586, 309.17292140162647, 309.17159140162704
T_CD_c_in = single([304.1398611014256, 304.1389026014248, 304.13794410142395, 304.13
m_CD_c = single([0.41697041999999984, 0.41697041999999984, 0.41697041999999984, 0.41

% Викликаємо dll-функцію
result = calllib('generator_dll', 'gen2c', T_CD_c_out_setpoint, ...
T_CD_cond_c_out, T_CD_c_in, m_CD_c);
result
    
```

Рисунк 1. Використання бібліотеки нейронної моделі в Matlab.

Другий шлях полягав у написанні мех-файлу з S-функцією для інтеграції моделі у Simulink (зображено на рис. 2). Використання мех-файлу дало можливість виконувати код на мові C безпосередньо в середовищі Simulink, що забезпечило моделювання роботи ТНУ в реальному часі. Це рішення було оптимальним для задач динамічного моделювання, оскільки S-функція забезпечує високу продуктивність і швидкість обчислень під час симуляції.



Рисунк 2. Використання S-блоку нейронної моделі в Simulink

Такий підхід дозволив поєднати гнучкість і точність нейронних моделей з потужними інструментами MATLAB Simulink, забезпечуючи

ефективне та швидке моделювання теплових процесів.

ТАБЛИЦЯ І. Результати тестування моделей

10000 ітерацій	Оригінальна модель	Модель на C	Matlab модель в dll	Simulink модель в S-Function
RMSE, K	1.735089e-03	1.735122e-03	1.735122e-03	1.735122e-03
Середній час на ітерацію, сек.	8.45e-02	7.85e-06	7.25e-05	5.2e-05

Аналіз результатів, представлених у таблиці 1, показує, що всі чотири варіанти моделей: оригінальна модель на Python, модель на C, а також інтеграції через DLL і S-функції в MATLAB/Simulink, — забезпечують майже однакову точність моделювання (близько 1.735122e-03 K). Тобто перехід між різними середовищами та мовами програмування не погіршив точність передбачень моделей, а використання нейронної мережі зберігає високу точність незалежно від обраної платформи.

Щодо швидкості обчислень, різниця між моделями стає більш очевидною. Оригінальна модель на Python демонструє найбільший час на одну ітерацію (8.45e-02 с), що можна пояснити обмеженнями інтерпретованої мови Python. Значне зниження часу спостерігається при використанні моделі, трансформованої у код на мові C (7.85e-06 с). Цей результат свідчить про ефективність конвертації та оптимізації виконання коду. Моделі, реалізовані у MATLAB через DLL (7.25e-05 с) та S-функції в Simulink (5.2e-05 с), також показали покращену продуктивність порівняно з оригінальною моделлю.

### III. ВИСНОВКИ

Розглянуто підходи інтеграції нейронної моделі ТНУ в середовище Matlab Simulink з метою забезпечення високої швидкості та точності реалізації. Найкращий результат досягається при використанні моделі на C, що робить її найбільш ефективною для вирішення завдань, які вимагають значних обчислювальних ресурсів. З точки зору інтеграції нейронної мережі в MATLAB та Simulink для моделювання складних систем в реальному часі, використання S-функцій є ефективним рішенням, оскільки це дає можливість поєднати високу продуктивність та простоту інтеграції в дане середовище.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Bahadir Erman Yuce. Bitlis Eren University Journal of Science and Technology. 2020. №10(2). С.84–87. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.058.
- [2] Ahmet Kose, Eduard Petlenkov. System Identification Models and Using Neural Networks for Ground Source Heat Pump with Ground Temperature Modeling. 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 2016. С.2850–2855. DOI: 10.1109/IJCNN.2016.7727676.
- [3] Sven Myrdahl Opalic, Morten Goodwin, Lei Jiao, Henrik Kofoed Nielsen, Angel Alvarez Pardinias, Armin Hafner, Mohan Lal Kolhe. ANN Modelling of CO2 Refrigerant Cooling System COP in a Smart Warehouse. Journal of Cleaner Production. 2020. №260. С. 120887. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120887.



## Modeling, control and information technologies – 2024

- [4] Sven Myrdahl Opalic, Morten Goodwin, Lei Jiao, Henrik Kofoed Nielsen, Mohan Lal Kolhe. Modelling of Compressors in an Industrial CO<sub>2</sub>-Based Operational Cooling System Using ANN for Energy Management Purposes. In: J. Macintyre et al. (Eds.), *Engineering Applications of Neural Networks, Communications in Computer and Information Science*, vol 1000. Springer, Cham. 2019. С. 43–54. DOI: 10.1007/978-3-030-20257-6\_4..
- [5] Jun Kwon Hwang, Geun Young Yun, Suk Ho Lee, Hyeongjoon Seo, Mat Santamouris. Using Deep Learning Approaches with Variable Selection Process to Predict the Energy Performance of a Heating and Cooling System. *Renewable Energy*. 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.113.
- [6] Волошук В. А., Шиндилюк П. В., Некрашевич О. В., Богза М. С., Гікало П. В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «повітря-вода». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34. № 73. С. 36-44. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
- [7] Волошук В. А., Шиндилюк П. В., Некрашевич О. В., Богза М. С., Гікало П. В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «вода-вода». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34. № 2. С. 36-44. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
- [8] Богза М. С., Волошук В. А. Застосування методів машинного навчання у задачах моделювання динаміки теплонасосних установок. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 35. № 4. С. 52-58. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.4/09.
- [9] Rory Conlin, Keith Erickson, Joseph Abbate, Egemen Kolemen. Keras2c: A Library for Converting Keras Neural Networks to Real-Time Compatible C. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2021. №100. С. 104182. DOI: 10.1016/j.engappai.2021.104182.

# *Інноваційні алгоритми цифрових пристроїв РЗА для трансформації українських розподільчих електромереж*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.022>

Володимир Волянський  
Національний університет водного  
господарства та природокористування,  
м. Рівне, Україна  
[v.m.volyanskyj@nuwm.edu.ua](mailto:v.m.volyanskyj@nuwm.edu.ua)

Олексій Глущенко  
Національний університет водного господарства  
та природокористування,  
м. Рівне, Україна  
[o.a.glushchenko@nuwm.edu.ua](mailto:o.a.glushchenko@nuwm.edu.ua)

## **Постановка проблеми**

Сучасні світові тенденції розвитку електроенергетики демонструють стрімке зростання частки відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ), таких як сонячні та вітрові електростанції. Перехід до «зеленої» генерації є невід'ємною частиною глобальної стратегії зі скорочення викидів вуглецю та відмови від традиційних методів виробництва електроенергії на теплових електростанціях (ТЕС), які є основними джерелами забруднення довкілля.

## **I Особливості процесу децентралізації генерації в Україні**

В Україні основою виробництва електроенергії є атомні електростанції (АЕС), які забезпечують понад 50% всієї виробленої електроенергії. У той же час основні регулюючі маневрові потужності представлені тепловими (ТЕС, ТЕЦ) та гідроелектростанціями (ГЕС), але від початку широкомасштабного вторгнення росії в Україну від масованих атак на українську електроенергетику було знищено близько 80% теплової генерації та 40% потужностей гідроелектростанцій.

## **II Інноваційні алгоритми пристроїв РЗА в умовах децентралізації генерації та збільшення частки ВДЕ**

Перехід України на децентралізовану систему генерації на основі ВДЕ потребує модернізації існуючих систем релейного захисту та автоматики (РЗА). Цифрові пристрої РЗА виготовлені згідно з стандартом IEC61850 повинні адаптуватися до нових умов, в яких кількість джерел генерації значно збільшується, а їх потужність змінюється в залежності від зовнішніх факторів, таких як погодні умови або зміна режимів роботи системи внаслідок бойових дій.

Нові підходи до розробки алгоритмів захисту

Для забезпечення надійної роботи енергосистеми в нових умовах необхідні передові алгоритми захисту, здатні ефективно працювати в розподілених мережах з високим рівнем інтеграції відновлюваної енергетики.

Адаптивний релейний захист.

Диференціальний захист ліній з абсолютною селективністю для розподільчих мереж.

Штучний інтелект та машинне навчання.

Алгоритми захисту синхронізованих векторних вимірювань (WAMS).

Впровадження нових технологій у рамках стандарту IEC61850

Цифрові пристрої захисту, розроблені у відповідності з стандартом IEC61850, вже мають ряд переваг перед традиційними системами. Їх головною перевагою є підтримка особливих протоколів зв'язку та можливість інтеграції з іншими інтелектуальними системами управління мережею в єдину систему. Для успішної роботи в умовах збільшення частки відновлюваних джерел енергії необхідно розширити функціональні можливості пристроїв захисту, в тому числі:

Підтримка адаптивних алгоритмів захисту;

Можливість роботи з великим обсягом даних в режимі реального часу;

Інтеграція з WAMS та AI системами.

Переваги та перспективи впровадження інноваційних алгоритмів

Впровадження нових алгоритмів захисту в розподільчих мережах України має значні переваги:

Скорочення часу реагування на надзвичайні ситуації.

Підвищення надійності систем захисту.

Покращена координація між джерелами генерації.

Впровадження таких технологій в Україні буде спрямоване на:

Розширення сфери застосування адаптивного захисту в мережах всіх рівнів напруги.

Гармонізацію роботи ВДЕ з базовими джерелами генерації (АЕС та ГЕС).

Впровадження Smart Grids.

## **III Покращення параметрів швидкодії та селективності захистів**

Ефективний захист енергосистеми, особливо в контексті інтеграції відновлювальних джерел енергії та децентралізації генерації, потребує

покращення швидкості та селективності роботи релейного захисту. Зміни в динаміці мережі, пов'язані з нестабільністю генерації, вимагають розробки нових методів, спрямованих на поліпшення характеристик РЗА.

1. Нові методи зменшення часу спрацьовування захистів в умовах варіативної генерації.

2. Селективність захистів.

3. Використання цифрового зв'язку на основі IEC61850 для забезпечення обміну даними між пристроями релейного захисту.

#### **IV Переваги та недоліки запропонованих рішень**

1. Порівняння нових алгоритмів з традиційними системами захисту

Нові адаптивні та інтелектуальні алгоритми захисту значно перевершують традиційні системи релейного захисту за такими параметрами:

Швидкодія.

Селективність.

Інтеграція з цифровими технологіями.

2. Оцінка складності впровадження та необхідності модернізації мережевої інфраструктури

Вимоги до модернізації інфраструктури.

Вартість та складність впровадження.

3. Технічні обмеження

Проблеми передачі даних.

Адаптивні алгоритми захисту, хоча і більш точні, але можуть бути більш чутливими до помилок.

V Вплив на роботу дистриб'юторської мережі

1. Прогнозування та попередження відмов системи за допомогою цифрового релейного захисту.

2. Вплив алгоритмів захисту на продовження терміну служби обладнання та скорочення аварійних простоїв.

3. Інтеграція з SCADA та EMS системами для централізованого управління мережею.

#### **VI Перспективи подальших досліджень та розробок систем релейного захисту та автоматики**

1. Розробка алгоритмів з використанням нейронних мереж і цифрових двійників

2. Огляд можливих напрямків подальших досліджень і вдосконалення систем РЗА.

Висновки

Важливість впровадження нових алгоритмів полягає в їх здатності адаптуватися до динамічних змін в мережах зі змінною генерацією з ВДЕ. Використання сучасних технологій, таких як нейронні мережі та цифрові двійники, забезпечує прогнозу аналітику та прогнозування несправностей, що покращує управління мережею та запобігає серйозним аваріям електромереж.

Цифровий релейний захист відіграє ключову роль у трансформації електроенергетики України. Сучасні РЗА забезпечують гнучкість та адаптивність у роботі з розподіленою генерацією, дозволяючи більш ефективно інтегрувати

відновлювані джерела енергії у Об'єднану Енергосистему України. Розробка та впровадження таких рішень сприятиме зменшенню аварійних відключень, збільшенню терміну експлуатації обладнання та створенню більш стійкої енергетичної інфраструктури, що відповідає викликам сьогодення.

Таким чином, подальші дослідження та розробки в галузі цифрового релейного захисту, орієнтовані на використання штучного інтелекту, нові стандарти та вдосконалення протоколів зв'язку, стануть ключовими факторами підвищення надійності та стійкості енергосистеми майбутнього.

# Коригування проекту Канівської ГАЕС з урахуванням сучасних вимог енергосистеми України та захисту споруд

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.023>

Вадим Галат  
ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»,  
Харків, Україна  
e-mail [gallat.vadim@gmail.com](mailto:gallat.vadim@gmail.com)

Вадим Крайник  
ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»,  
Харків, Україна  
e-mail [kvya09@ukr.net](mailto:kvya09@ukr.net)

**Анотація** – у статті викладено обґрунтування необхідності коригування проекту Канівської ГАЕС та основні напрямки цієї роботи. Розглянуті варіанти вибору основного гідросилового обладнання та захисту об'єкту від силового впливу

**Ключові слова** – енергосистема, гідрогенератор, ГКЗ, СГ, АСГ

## I. ВСТУП

Ідея будівництва Канівської ГАЕС виникла в кінці 90-х років минулого століття на підставі необхідності забезпечувати регулюючі потужності для значно зростаючих на той час обсягів генерації енергоблоків атомних станцій. Відповідно загальна потужність Канівської ГАЕС на той час становила 3600 МВт.

Значні зміни в структурі генерації, споживання і власне самій енергосистемі незалежної України в 90-х роках та на початку 2000 років потребували зміни основних параметрів Канівської ГАЕС.

З урахуванням цього, розробленим та затвердженим у 2013 р. проектом передбачено будівництво Канівської ГАЕС встановленою потужністю 1000 МВт у турбінному режимі та встановленням чотирьох оборотних гідроагрегатів по 250 МВт [1].

З часу розробки та затвердження проекту Будівництво Канівської ГАЕС значно змінилася структура генеруючих потужностей та енергоспоживання в енергосистемі України. Дедалі збільшується частка в обсягах генерації від сонячних та вітрових електростанцій, які також потребують більшої участі гідроагрегатів з більш широким діапазоном регулювання потужності в енергосистемі.

Під час великомасштабної війни росії проти України, розпочатої в лютому 2022 р., енергосистема зазнала значних змін як у генерації електричних потужностей, так і в їхньому споживанні. Спостерігається значне зниження цих показників. Насамперед головну роль тут відіграло руйнування

як енергетичних підприємств і мереж, так і великих енергоспоживаючих підприємств. Велику роль відіграло відчуження від Єдиної Енергосистеми України Запорізької АЕС. На сьогоднішній день є гостра потреба не тільки в регулюючих потужностях гідроелектростанцій, а й у створенні достатньої кількості генеруючих потужностей з можливістю глибшого їх регулювання. У післявоєнний період на Україну чекає час відновлення енергопідприємств та мереж, з будівництвом нових джерел вироблення електроенергії. Спираючись на майбутнє приєднання України до Євросоюзу і, відповідно, приєднання до Єдиної Європейської енергосистеми, необхідно вже зараз на перспективних об'єктах енергетики України передбачати шляхи інтеграції. На сьогоднішній день і на найближче майбутнє найбільш стабільним та ємним джерелом регульованої потужності є гідроенергетика.

## II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Заданням на коригування проекту Будівництва Канівської ГАЕС передбачається вирішення двох основних проблем:

1. Забезпечення широких можливостей регулювання частоти та потужності в енергосистемі України з урахуванням значного збільшення частки сонячної та вітрової генерації.
2. Забезпечення захисту критичного обладнання та споруд від ракетних атак.

На сьогоднішній день з урахуванням сучасних розробок провідних на міжнародному рівні енергомашинобудівних підприємств для розширення можливостей маневрування потужностями гідроакумуляуючих станцій у насосному режимі застосовуються такі способи:

- установка гідроагрегатів різної потужності для можливості ширшого, але лінійного покриття графіка профіциту потужності

- розширення зони роботи гідромашини в насосному режимі шляхом зміни швидкості її

обертання та відповідної споживаної потужності. Це досягається

шляхом застосування асинхронних двигунів-генераторів у поєднанні з конверторами щодо зміни частоти обертання або застосування синхронних генераторів-двигунів потужністю до 120 МВт із застосуванням повнопривідних конверторів

- використання так званого гідравлічного короткого замикання (ГКЗ), суть якого полягає в одночасному використанні двох оборотних машин у турбінному та насосному режимах

На Канівській ГАЕС із створеними напорами 80-115 м встановлюються оборотні гідроагрегати радіально-осьового типу (турбіни Френсіса). Відповідно до специфіки конструкції та відповідно до міжнародного стандарту на конструювання гідротурбін, турбіни Френсіса можуть працювати в діапазоні від 60% до 100% номінальної потужності при будь-якому напорі в зоні роботи. Сучасні розробки провідних світових виробників гідротурбін досягли розширення цієї зони до 40-100% в турбінному режимі. Однак, щоб отримати очікуване енергосистемою зниження одиничної потужності агрегатів слід зменшити їхню номінальну потужність.

Для визначення рекомендованих для подальшого розгляду варіантів одиничної потужності та типу двигуна-генератора було розглянуто наступні варіанти, включно з базовим затвердженого проекту, дивитись таблицю 1.

ТАБЛИЦЯ 1. Експертне порівняння варіантів.

Канівська ГАЕС потужністю 1000/1040 МВт. Експертне порівняння варіантів				
Регулювання потужності ГАЕС (1000/1040 – 100%)	Варіант 1. 4 агрегати по 250 МВт Постійна частота обертання	Варіант 2. 4 агрегати по 250 МВт Змінна частота обертання	Варіант 3. 4 агрегати по 200 МВт + 2 агрегати по 100 МВт Постійна частота обертання	Варіант 4. 6 агрегатів по 166,7 МВт, із них: 4 – постійна частота обертання; 2 – змінна частота обертання
Регулювання потужності в турбінному режимі				
Регулювання потужності в насосному режимі				
Відносна вартість агрегатів	4 x 100%	4 x 140%	4 x 90% + 2 x 80%	4 x 85% + 2 x 119%
Сумарна відносна вартість агрегатів ГАЕС	400%	560%	520%	574%

Оскільки інформація по роботі енергосистеми України в воєнний час є закритою, буди проаналізовані ймовірні режими роботи і прогнози баланси гідроенергетичних об'єктів ПрАТ «Укргідроенерго» при різних сценаріях розвитку ОЕС України

З урахуванням результатів проведеного аналізу та попередніх розрахунків по покриттю графіка навантажень розглядаються 3 варіанти гідросилового обладнання ГАЕС:

1. Варіант 1 – установка 4-х насос-турбін із синхронними генераторами (СГ) потужністю по 250 МВт – варіант проекту, що підлягає коригуванню. При роботі з СГ у турбінному режимі можливе регулювання потужності з 40 до 100%, у насосному режимі регулювання потужності не можливе

2. Варіант 2 - установка 2-х насос-турбін з СГ потужністю по 200 МВт, 2-х насос-турбін з асинхронними генераторами (АСГ) потужністю по 200 МВт та 2-х насос-турбін з СГ потужністю по 100 МВт. Можливість роботи всіх агрегатів станції у режимі ГКЗ не передбачається. Під час роботи з АСГ у турбінному режимі можливе регулювання потужності з 30 до 100%, у насосному режимі – з 60 до 100%.

3. Варіант 3 - установка 6-и насос-турбін із СГ потужністю по 167 МВт. У цьому варіанті передбачається можливість роботи всіх агрегатів станції в режимі ГКЗ

Слід зазначити, що на етапі коригування проекту Будівництва Канівської ГАЕС будуть виконані біль детальні обґрунтування вибору типу та одиничної потужності ГАЕС.

Важливим елементом коригування проекту є збільшення обсягу верхньої водойми ГАЕС. Метою такого коригування є підвищення ефективності роботи ГАЕС за рахунок збільшення годин роботи в генераторному і насосному режимах і ,відповідно, розширення послуг на ринку електричної енергії і потужності (допоміжних послуг). Оскільки основні параметри Канівської ГАЕС вже є затвердженими, загальний обсяг збільшення верхньої водойми не може перевищувати 10 млн. м3. Розширення площі верхньої водойми не призведе до зниження або пошкодження наявних в районі будівництва археологічних пам'яток.

Для забезпечення захисту від силового впливу передбачено розміщення будівлі під суцільним

ґрунтовим насипом. У верхній зоні насипу над будівлею ГАЕС передбачено влаштування так званого “тюфяка” — суцільної бетонної плити, призначеної для приймання безпосередньо вибуху боєприпасу, енергія якого має затухати при проходженні шару з ущільненого ґрунту. З боку НБ будівля ГАЕС захищає пазуха з залізобетонними стінами з заповненням ґрунтом. Також захисним шаром ґрунту закриваються напірні водоводи. В цілому, концепція конструктивних та компонувальних рішень по всім спорудам Канівської ГАЕС передбачає захист обладнання та персоналу станції з можливістю продовження роботи під час повітряних тривог.

### III. ВИСНОВКИ

Коригування проекту Будівництва Канівської ГАЕС відповідає сучасним вимогам енергосистеми України та заходам по забезпеченню захисту обладнання і споруд від силового впливу. Коригування проекту призведе до значного покращення загальних характеристик ГАЕС та дозволить більш ефективно працювати на енергетичному ринку України.

Зазначені конструктивні та архітектурні зміни в цілому позитивно вплинуть на збереження ландшафту Канівських гір та забезпечать більш гармонійне співіснування високотехнологічної енергетичної споруди та навколишнього середовища.

#### Література

[1] Будівництво Канівської ГАЕС. Проект



# Експериментальні дослідження моделей турбін малих гідроелектростанцій

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.024>

Олександр Герба

Національний університет водного господарства  
та природокористування, Рівне  
[o.v.herba@nuwm.edu.ua](mailto:o.v.herba@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – Вдосконалення турбін шнекового типу є одним із перспективних напрямів у розробці сучасних енергетичних установок. Запропоновані конструкції шнекових турбін поліпшеного типу мають особливий дизайн, що дозволяє ефективніше використовувати потоки повітря або рідини, які проходять через турбіни, збільшуючи їх ефективність. У статті описано дослідження і аналіз конструкційних особливостей шнекових турбін поліпшеного типу.

**Ключові слова** – спіралеподібна турбіна, турбіна гвинтового типу, шнекова турбіна, гідроелектростанції, ефективність.

## I. ВСТУП

При експлуатації малих ГЕС часто використовують шнекові, гвинтові, спіралеподібні та інші типи турбін. Для роботи на малих перепадах (від 1 м до 10м), та у потоках води (від 0,5 м<sup>3</sup>/с до 10 м<sup>3</sup>/с), зазвичай використовують шнекові турбіни [1]. Однією з переваг шнекових турбін є висока ефективність роботи при малій швидкості обертання валу (більше 80 %). Діапазон потужності складає від 10 кВт до 650 кВт [2].

Поліпшеним типом шнекових турбін є запропоновані спіралеподібні турбіни [3, 4] та турбіни гвинтового типу [5], які привертають увагу завдяки своїм унікальним конструкційним особливостям, що сприяють підвищенню ефективності та надійності. Спіралеподібні та гвинтові турбіни, що мають спеціальну геометрію лопатей, які нерухомо з'єднані з корпусом, дозволяють підвищити ефективність перетворення енергії. Останні дослідження спрямовані на вдосконалення цих моделей турбін, зокрема на покращення їхньої аеродинаміки і експлуатаційних характеристик.

Основне завдання в дослідженнях поліпшеного типу шнекових турбін полягає у визначенні оптимальної геометрії спіралеподібних та гвинтових турбін для підвищення їх енергоефективності.

## II. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ У ВОДЯНОМУ ПОТОЦІ З МОДЕЛЯМИ ТУРБІН

Для оцінки ефективності поліпшених шнекових турбін були проведені експериментальні дослідження у водяному потоці п'яти моделей турбін: трьох спіралеподібних [3, 4], однієї гвинтового типу [5], та однієї шнекової [1].

Планування експериментів для спіралеподібних (шнекових) турбін у водяному потоці є важливим та головним етапом для перевірки їх ефективності. Такий експеримент вимагає точного підходу, що включає визначення мети дослідження, вибір відповідних параметрів і влаштування експериментального стенду в лабораторну установку [6] з направленим водним потоком.

Основною метою експериментальних досліджень поліпшених моделей шнекових турбін у водяному потоці є:

- оцінка ефективності, тобто визначити, наскільки ефективно турбіни перетворюють енергію водяного потоку на механічну та електричну енергію;
- тестування та порівняння різних варіантів конструкцій, дизайну корпусів та геометрії лопатей турбін для виявлення оптимальних характеристик;
- вивчення впливу параметрів потоку та аналіз того, як зміна рівня води у верхньому б'єфі впливає на продуктивність турбіни.

В результаті планування дослідів було визначено основні параметри досліджень, які варто контролювати під час експериментальних досліджень. До цих параметрів віднесені такі:

- $n_1$  – кількість обертів турбіни в режимі холостого ходу, об/хв;
- $n_2$  – кількість обертів турбіни під навантаженням (1·12в/21 Вт), об/хв;
- $n_3$  – кількість обертів турбіни під навантаженням (2·12в/21 Вт), об/хв;
- $n_4$  – кількість обертів турбіни під навантаженням (3·12в/21 Вт), об/хв;
- $U_1$  – вироблена генератором електрична напруга без навантаження, В;
- $U_2$  – вироблена генератором напруга під навантаженням (1·12в/21 Вт), В;
- $U_3$  – вироблена генератором напруга під навантаженням (2·12в/21 Вт), В;
- $U_4$  – вироблена генератором напруга під навантаженням (3·12в/21 Вт), В;
- $h$  – рівень води у верхньому б'єфі, см;
- $h_1$  – рівень води у нижньому б'єфі, см;
- $h_0$  – рівень води у верхньому б'єфі, при якому проходить страгування моделі турбіни, см;
- $P_1$  – електричне навантаження в режимі холостого ходу, потужність 0 Вт;
- $P_2$  – електричне навантаження потужністю 21Вт;
- $P_3$  – електричне навантаження потужністю 42Вт;

$P_4$  – електричне навантаження потужністю 63Вт.

Експериментальний стенд для дослідів у водяному потоці дообладнується приладами для вимірювання швидкості обертання досліджуваної моделі турбіни і генерованої електричної напруги. Для зняття показів по виробництву електричної напруги в режимах холостого ходу ( $P_1$ ), та під навантаженням ( $P_2, P_3, P_4$ ), до генератора підключено блок керування навантаженням, де роль навантаження виконують 3 лампи розжарення по 12в, потужністю 21Вт.

Для дослідження впливу кількох параметрів одночасно (висота води у верхньому б'єфі, ступінь навантаження, геометрія лопатей турбін) використано методи факторного планування [7, 8]. Це дозволяє одночасно аналізувати кілька змінних і їхній вплив на продуктивність турбін. Для досягнення надійних результатів експерименти повторювалися по кілька разів при різних умовах.

Щоб порівняти ефективність запропонованих конструкцій турбін з вже існуючими класичними прототипами надруковано шнекову турбіну відповідних розмірів (ø 200мм, 210мм), що дало можливість провести контрольні експерименти з турбіною шнекової конструкції для порівняння результатів з іншими конструкціями та визначення ефективності.

Проведення експериментальних досліджень у водяному потоці заплановано в два етапи, а саме:

- Експериментальні дослідження моделей турбін у водяному потоці під кутом 45° до лопатей;
- Аналіз та порівняння результатів з визначенням оптимальної конструкції моделі турбіни.

Під час проведення експериментів всі дані (швидкість обертання, вироблена напруга в різних режимах, рівень води у верхньому б'єфі тощо) записуються в таблиці (табл. 1-3) для подальших аналізів й висновків. Дані можна обробляти за допомогою методів регресійного або дисперсійного аналізу [9], щоб виявити залежності між параметрами потоку і продуктивністю турбін.

Існують різні методи планування постановки експериментів, направлені на зменшення кількості дослідів. Якщо запланувати досліди по принципу активного експерименту, який полягає в тому, що розташування точок вимірювання у міжфакторному просторі алгоритмізоване, то кількість необхідних дослідів зменшиться у 5-10 разів у порівнянні з традиційними методами [7, 8].

Для визначення найкращого варіанту моделі турбіни на основі аналізу впливу рівня води у верхньому б'єфі на конструкції досліджуваних турбін в режимах холостого ходу ( $P_1$ ) та під навантаженням ( $P_2, P_3, P_4$ ) кожній з них надаватимемо по шість значень рівня верхнього б'єфа ( $h$ ). Тоді для визначення ефективнішого варіанту серед досліджуваних турбін, необхідно зробити  $5 \cdot 24 = 120$  дослідів, при яких потрібно зняти 240 показників.

### III. ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТУРБІН У ВОДЯНОМУ ПОТОЦІ

Для дослідження моделей у водному потоці, в умовах впливу двох змінних на характеристики модифікованих шнекових турбін використано факторний експеримент. Це дозволить дослідити вплив кожного з факторів (висота води у верхньому б'єфі та навантаження), а також їх взаємодію. В результаті потрібно провести експерименти для кожної комбінації рівнів факторів, щоб визначити залежність.

Для наступного порівняння результатів експериментів, розміри досліджуваних моделей турбін надруковано однаковими (ø200мм, 210мм), а їх вага приведена до позначки 1100 грам (шляхом намотування витків дроту на корпус з балансуванням). При цьому відхилення по вазі складо допустимих  $\pm 5\%$ .

В таблицях 1 – 3 зафіксовано отримані показники, вироблених досліджуваними моделями турбін, числа обертів ( $n$ ) та вихідної напруги ( $U$ ) з генераторів в чотирьох режимах ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ) та при п'яти рівнях води у верхньому б'єфі ( $h$ ). При цьому також зафіксовано відповідний момент страгування ( $h_0$ ) у водному потоці, під кутом 45° до лопатей.

Таблиця 1. Отримані показники на моделях СПІРАЛЕПОДІБНИХ ТУРБІН: ЧИСЛО ОБЕРТІВ, ВИХІДНА НАПРУГА З ГЕНЕРАТОРА В ЧОТИРЬОХ РЕЖИМАХ ТА ПРИ П'ЯТИ РІВНЯХ ВОДИ У ВЕРХНЬОМУ Б'ЄФІ

Мод.	$P$	$h_0$	$h$	20	30	40	50	60	
турбіна з будовою лопатей за принципом зологої спіралі	$P_1$	12,8	$U_1, В$	7,5	11,8	13,7	15,4	17,7	
			$n_1, об/хв$	177	270	324	375	420	
	$P_2$	14,2	$U_2, В$	6,1	10,2	12,5	14,4	16,2	
			$n_2, об/хв$	151	248	306	348	390	
	$P_3$	15,9	$U_3, В$	4,5	9	10,9	12,9	15	
			$n_3, об/хв$	127	226	278	326	360	
	$P_4$	17	$U_4, В$	3,5	7,9	10,2	12	14,1	
			$n_4, об/хв$	101	200	252	306	337	
			2,1	$h_1$	4,8	9,1	12,2	13,8	14,9
	турбіна з спіралеподібними лопатями, які збільшуються в об'ємі	$P_1$	10,8	$U_1, В$	7,4	11,4	15,4	17	18
				$n_1, об/хв$	168	278	360	412	447
		$P_2$	13,5	$U_2, В$	5,7	10,2	13,8	15,7	16,7
$n_2, об/хв$				141	254	324	384	410	
$P_3$		14,9	$U_3, В$	4,7	8,5	12	14,2	15,2	
			$n_3, об/хв$	118	220	292	353	375	
$P_4$		15,9	$U_4, В$	3,7	7,1	10,4	12	14,4	
			$n_4, об/хв$	101	184	258	304	340	
			2,1	$h_1$	4,8	9,1	12,2	13,8	14,9
турбіна з спіралеподібними лопатями зі зменшеним корпусом		$P_1$	9,3	$U_1, В$	6,8	10,8	14,8	17	19
				$n_1, об/хв$	170	270	335	409	443
		$P_2$	14,7	$U_2, В$	4,7	8,9	12,2	14,4	16,5
	$n_2, об/хв$			138	203	294	365	400	
	$P_3$	16	$U_3, В$	3,2	6,9	10,1	12,7	14,3	
			$n_3, об/хв$	97	175	250	310	353	
	$P_4$	17,2	$U_4, В$	2,3	5,4	8,5	11,2	12,8	
			$n_4, об/хв$	73	150	218	275	323	
			1,9	$h_1$	4,5	9	9,4	12,5	13,8

ТАБЛИЦЯ 2. ОТРИМАНІ ПОКАЗНИКИ МОДЕЛЕЮ ТУРБИНИ ГВИНТОВОГО ТИПУ: ЧИСЛО ОБЕРТІВ, ВИХІДНА НАПРУГА З ГЕНЕРАТОРА В ЧОТИРЬОХ РЕЖИМАХ ТА ПРИ П'ЯТИ РІВНЯХ ВОДИ У ВЕРХНЬОМУ Б'ЄФІ

$P$	$h_0$	$h$	19	30	40	50	60
$P_1$	8,2	$U_1, В$	8,5	13,1	15,5	17,9	20
		$n_1, об/хв$	192	304	379	420	471
$P_2$	13,3	$U_2, В$	6,9	11	13,8	16,3	18
		$n_2, об/хв$	159	264	330	387	430
$P_3$	14,8	$U_3, В$	4,9	9,2	12,1	14,3	16,3
		$n_3, об/хв$	128	236	306	358	401
$P_4$	16	$U_4, В$	3,7	8,3	11	13,1	15,2
		$n_4, об/хв$	106	210	280	330	372
	1,7	$h_1$	4,5	9	12,2	13,8	14,9

ТАБЛИЦЯ 3. ОТРИМАНІ ПОКАЗНИКИ МОДЕЛЕЮ ШНЕКОВОЇ ТУРБИНИ: ЧИСЛО ОБЕРТІВ, ВИХІДНА НАПРУГА З ГЕНЕРАТОРА В ЧОТИРЬОХ РЕЖИМАХ ТА ПРИ П'ЯТИ РІВНЯХ ВОДИ У ВЕРХНЬОМУ Б'ЄФІ

$P$	$h_0$	$h$	20	31	41	51	60
$P_1$	13,8	$U_1, В$	7,2	11,2	13,1	15,4	17
		$n_1, об/хв$	187	275	328	368	400
$P_2$	15,2	$U_2, В$	5,5	9,6	11,8	13,7	15,5
		$n_2, об/хв$	140	227	286	328	370
$P_3$	16,7	$U_3, В$	4,2	8,3	10,5	12,5	14,3
		$n_3, об/хв$	109	201	257	302	340
$P_4$	18	$U_4, В$	3	7,2	9,4	11,4	13,2
		$h$	81	175	230	280	315
	2,1	$U_1, В$	4,6	9,2	12,4	14	15,3

Після проведення експериментів досліджуваних моделей турбін на кожній позначці рівнів висоти води у верхньому б'єфі ( $h$ ) та зміні навантаження ( $P$ ), виконано аналіз впливу факторів на вихідні параметри (швидкість обертання турбіни  $n$ , електрична напруга ( $U$ ), для вибору оптимальної моделі турбіни, а також визначення її ефективності. З метою проведення аналізу ефективності турбін, побудовано графіки залежностей виробленої напруги ( $U$ ) генератором від висоти води у верхньому б'єфі ( $h$ ) для кожного рівня навантаження ( $P$ ) (рис. 1, 2), а також графіки залежності виробленої турбінами числа обертів від висоти води у верхньому б'єфі ( $h$ ), для кожного рівня навантаження (рис. 3, 4).

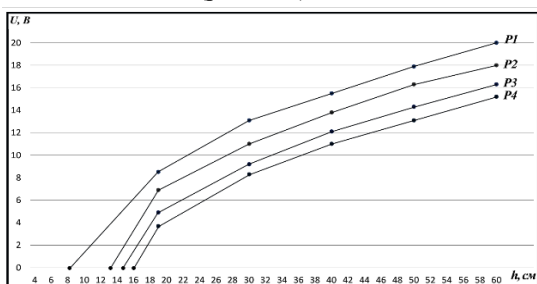


Рис. 1. Графік залежності вироблення генератором та турбіною гвинтового типу напруги в різних режимах навантаження від рівня води у верхньому б'єфі

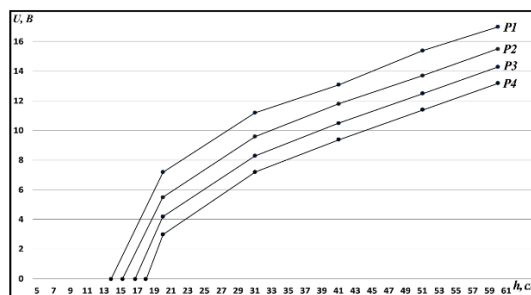


Рис. 2. Графік залежності вироблення генератором та шнековою турбіною напруги в різних режимах навантаження від рівня води у верхньому б'єфі

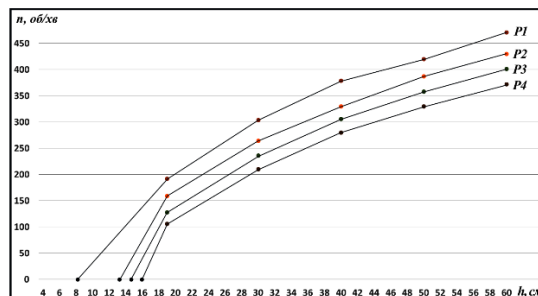


Рис. 3. Графік залежності вироблення генератором та турбіною гвинтового типу обертів  $n$  в різних режимах навантаження від рівня води у верхньому б'єфі

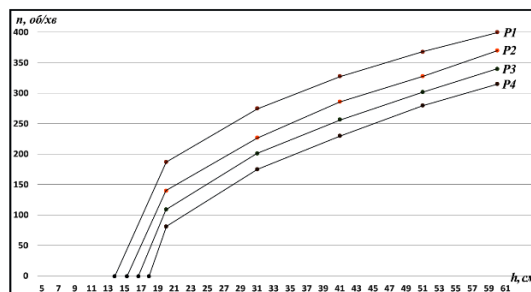


Рис. 4. Графік залежності вироблення генератором та шнековою турбіною обертів  $n$  в різних режимах навантаження від рівня води у верхньому б'єфі

Щоб вивчити взаємозв'язок висоти води у верхньому б'єфі і навантаження на моделі турбін у направленому потоці під кутом  $45^\circ$  до лопатей проведено порівняння отриманих параметрів для шнекової турбіни та турбіни гвинтового типу. Це дозволяє визначити як зміна одного фактору (наприклад, висоти води у верхньому б'єфі) впливає на вихідний параметр при різних значеннях другого фактору (навантаження).

Висота води у верхньому б'єфі визначає потенціальну енергію потоку. Зі збільшенням рівня води  $h$  збільшується швидкість потоку, що в свою чергу призводить до збільшення швидкості обертання турбіни гвинтового типу  $n_1 = 471$  об/хв та вироблення напруги генератором  $U_1 = 17,7$ в (табл. 2). При цьому відповідні показники шнекової турбіни в режимі холодного ходу становили:  $n_1 = 400$  об/хв;  $U_1 = 17$ в (табл. 3).

Навантаження на турбіни впливає на їх швидкість обертання та вироблення електричної енергії генераторами. Як видно на рис. 3, 4 зі збільшенням навантаження, частота обертання порівнювальних турбін зменшуються, що призводить до зниження напруги, а саме: напруга

на генераторі гвинтової турбіни при максимальному навантаженні  $U_4 = 15,2\text{в}$ , проти  $U_4 = 13,2\text{в}$  на генераторі шнекової турбіни. Також відрізняється частота обертання турбін: турбіна гвинтового типу має частоту  $n_4 = 372$  об/хв при навантаженні  $P_4$ , а шнекова турбіна при такому ж навантаженні -  $n_4 = 315$  об/хв.

При конструктивних відмінностях досліджуваних турбін і однакової масі вдалося досягти кращих показників турбіни гвинтового типу порівняльно зі шнековою турбіною. При цьому напруга при холостому ході ( $P_1$ ) підвищилась на  $0,7\text{в}$  (4%), та на  $2\text{в}$  (15%) при максимальному навантаженні ( $P_4$ ).

#### IV. ВИСНОВКИ

1. На основі отриманих даних досліджень у водному потоці запропонованих варіантів моделей турбін було виявлено оптимальний варіант – турбіна гвинтового типу.

2. Підтвердилася дослідним шляхом ідея можливості використання корпусу турбіни як маховика.

3. Турбіна гвинтового типу виявилась на 15% більш ефективною від шнекової за виробітком електричної енергії при максимальному навантаженні та на 4% при роботі в режимі холостого ходу.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Шнекова турбіна <https://promenergia.com.ua/hidroturbiny/shnekova-turbina/> (дата звернення: 12.10.2024)
- [2] Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України. Технологічні особливості малих ГЕС. Том II. 2018 <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES2.pdf> (дата звернення: 12.10.2024)
- [3] Герба О. В. Використання турбін зі спіралеподібними лопатями / О. В. Герба // Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць. - Рівне : НУВГП, 2023. - Вип. 4(104). - С. 3-12.
- [4] Герба О.В. Патент на корисну модель №150304 «Турбіна зі спіралеподібними лопатями» 26.01.2022р. Бюл. №4
- [5] Герба О.В., Клюха О.О. Патент на корисну модель №156567 «Турбіна гвинтового типу» 10.07.2024р. Бюл. №28
- [6] Рябенко О.А. Хвилястий стрибок: монографія. – Рівне: НУВГП, 2022. – 277 с.
- [7] Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука. 1976. 296 с.
- [8] Протождяконов М. М., Тедер Р. И. Методика рационального планирования экспериментов / М.. Наука. 1970. 76 с.
- [9] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling and Brian P. Cambridge University, Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, Third Edition, 2007. – 1235p.

# Дослідження ефекту підтоплення трапецієвидних водомірів за допомогою автоматизованої системи вимірювань

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.025>

Роман Зайчук

Національний університет водного господарства та природокористування

Рівне, Україна

r.m.zaichuk@nuwm.edu.ua

**Анотація** – В статті наводяться приклади використання трапецієвидних водомірів у поєднанні з системами автоматизованих вимірювань для визначення фільтраційної витрати через земляні греблі гідроелектростанцій. Описані режими роботи таких водомірів та наведені результати лабораторних досліджень з визначення впливу ефекту підтоплення на пропускну здатність трапецієвидних водомірів.

**Ключові слова** – трапецієвидні водоміри, лабораторні дослідження, коефіцієнт підтоплення, пропускну здатність, автоматизована система.

## I. ВИКОРИСТАННЯ ВОДОМІРІВ НА ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ’ЄКТАХ УКРАЇНИ

Перевагою виробництва електроенергії на гідроелектростанціях є її прогнозованість та регульованість, що може гарантувати гнучкість та надійність роботи Об’єднаної енергетичної системи України. Тому сьогодні вкрай необхідним є стабільний та гармонійний розвиток гідроенергетики як основи енергетичної безпеки держави. Сучасні реалії вимагають від гідроенергетики постійного розвитку – збільшення потужності станцій та, як наслідок, щорічного виробництва електроенергії, екологічності виробництва та інноваційних рішень.

Для підвищення надійності роботи обладнання на ГЕС Дніпровського каскаду розроблені та впроваджуються відповідні заходи з підвищення рівня безпеки гідроспоруд, шляхом впровадження систем моніторингу їх стану та усунення дефектів, виявлених в процесі експлуатації.

Дренажні пристрої повинні забезпечувати ефективний збір та відведення фільтраційних вод з тіла і основи ґрунтової споруди, що сприяє покращенню умов фільтраційного режиму та загальної і місцевої стійкості низових укосів греблі. Відповідно, порушення роботи дренажних пристроїв має наслідком погіршення фільтраційного режиму та може сприяти виникненню як локального, так і більш масштабного оповзання низових укосів, а також виникнення фільтраційних деформацій. Забезпечення надійної роботи дренажу може розглядатися як один із важливих засобів забезпечення надійної роботи гідротехнічних споруд, зокрема, земляних гребель. Моніторинг

пропускну здатності фільтраційних вод як правило здійснюється за допомогою водомірів безнапірних потоків. В сучасних реаліях такі водоміри доповненні автоматичними датчиками вимірювання, найчастіше – це ультразвукові датчики відстані. Автоматичні датчики зведені в загальну систему моніторингу та дають цілодобово дані по фільтраційній витраті на гідроелектростанції.

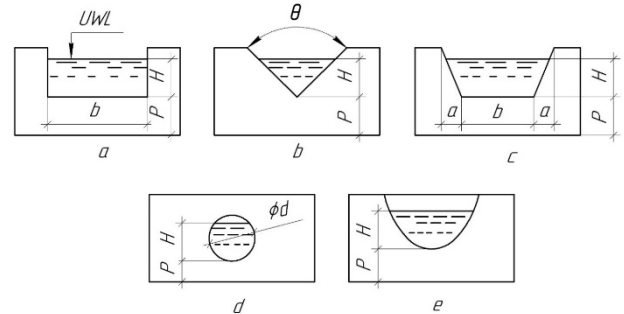


Рисунок 1 – Типи водомірів безнапірних потоків за формою поперечного перерізу: а – прямокутний, б – трикутний, с – трапецієвидний, д – круговий, е – параболічний

В натурних і лабораторних умовах найчастіше використовуються трикутні та трапецієвидні водоміри. В тілі земляних гребель ГЕС влаштована дренажна система, призначена для перехоплення фільтраційних вод і відведення їх в нижній б’єф [1-4]. Ця система складається з трубчастого дренажу, розміщеного вздовж осі греблі та водовипусків, які відводять воду у дренажний канал (рис. 2).

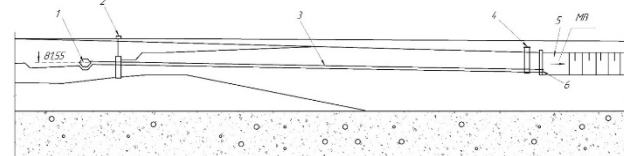


Рисунок 2 – Схема водовипуску дренажних вод: 1 - трубчастий дренаж, 2 - опускний п’єзометр, 3 - водовідвідна труба, 4 - колодязь для визначення рівня води в кінцевій частині водовідвідної труби, 5 - вихідний оголовок водовипуску, 6 - м’риний водозлив

## II. ТИПИ ГІДРАВЛІЧНИХ РЕЖИМІВ ТРАПЕЦІЄВИДНИХ ВОДОЗЛИВІВ

За типом гідравлічного режиму водозливи поділяються на підтоплені та непідтоплені [9]. При наявності спокійного режиму руху води



непідтопленим вважається водозлив у тонкій стінці, в якого відмітка рівня нижнього б'єфу є нижчою відміткою порогу водозливу (рис. 3). У лабораторних умовах водоміри влаштовують таким чином, щоб вони завжди працювали у непідтопленому режимі. В натурних умовах також прагнуть встановити водоміри так, щоб вони були непідтопленими.

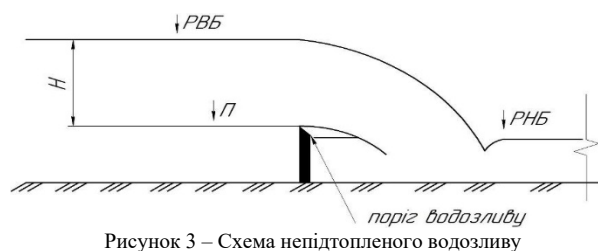


Рисунок 3 – Схема непідтопленого водозливу

Витрату води через непідтоплений симетричний трапецієвидний водомір можна знайти за формулою [1]

$$Q = mB\sqrt{2g}H^{3/2}, \quad (1)$$

В наведеній формулі (1)  $H$  – напір на порозі водозливу,  $m$  – коефіцієнт витрати водозливу,  $B$  – ширина порогу,  $g$  – прискорення вільного падіння. При цьому  $H$  та  $B$  виражаються в метрах, а витрата  $Q$  – в  $m^3/c$ .

Якщо ширину порога  $B$  і напір  $H$  виражати в метрах і прийняти  $m_b = 0,42$ ,  $g = 9,81$  м/с, то витрата  $Q$  виражається в метрах кубічних за секунду, а формула (1) приймає такий вигляд

$$Q = 1,86BH^{3/2}, \quad (2)$$

Розрахункові значення витрати  $Q$ , підраховані за формулою (2) наведені в табл.1

Таблиця 1 – Значення витрати  $Q$  трапецієвидного водоміру за формулою (2) при  $m_b = 0,42$ ,  $m_p = 0,25$ ,  $g = 981$  см/с<sup>2</sup>,  $B = 100$  см

$H$ , м	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$H$ , м	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$H$ , м	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$H$ , м	$Q$ , м <sup>3</sup> /с
0,05	0,021	0,14	0,097	0,26	0,247	0,44	0,542
0,06	0,027	0,15	0,108	0,28	0,276	0,46	0,580
0,07	0,034	0,16	0,119	0,30	0,306	0,48	0,617
0,08	0,042	0,17	0,134	0,32	0,337	0,50	0,659
0,09	0,050	0,18	0,142	0,34	0,369	0,60	0,865
0,10	0,059	0,19	0,154	0,36	0,402	0,70	0,880
0,11	0,068	0,20	0,162	0,38	0,436	0,80	1,331
0,12	0,077	0,22	0,192	0,40	0,475	0,90	1,588
0,13	0,087	0,24	0,219	0,42	0,508	1,00	1,860

Якщо  $B \neq 1,0$  м., то значення витрати  $Q$  у табл.1 необхідно помножити на дійсне значення ширини  $B$ , виражене в метрах.

Напір на порозі водозливу вимірюється за допомогою датчиків, а потім автоматично перераховується за відповідною залежністю у витрату. Необхідно підкреслити, що формули (1),

(2), а отже і результати автоматичних вимірювань, є чинними лише для непідтопленого водозливу, коли відмітка рівня води в нижньому б'єфі водозливу є нижчою відміткою його порогу (рис. 1), тобто

$$\downarrow РВБ < \downarrow П \quad (3)$$

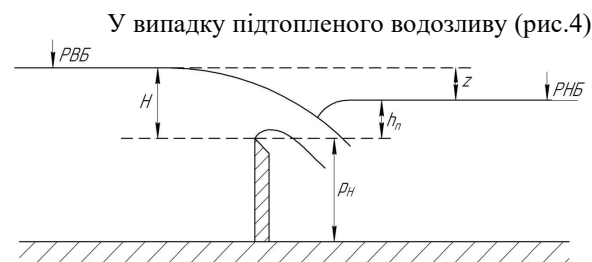


Рисунок 4 – Схема підтопленого водозливу

$$РВБ > \downarrow П, \quad (4)$$

водозлив є підтопленим, а формули (1),(2) містять певну похибку, пов'язану з ефектом підтоплення. При цьому значення такої похибки залежить від ступеня підтоплення водозливу, а датчики суттєво завищують значення фактичної витрати.

### III. ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ПІДТОПЛЕННЯ

З метою дослідження ефекту підтоплення, мною був проведений експеримент в лабораторії кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства та природокористування в прямокутному дзеркальному лотку, довжиною 15,6 м, шириною 1 м і висотою 1,2 м (рис. 5) було встановлено трапецієвидний водозлив в тонкій стінці з шириною порогу – 20см, перед і за яким були встановлені ультразвукові датчики для вимірювання рівня води [87] (рис. 5).

Отже, згідно рисунка 5 із напірного бака насосної станції вода по трубопроводу (1) поступала в голову лотка (3), проходила через вимірювальний трикутний водозлив (5), заспокійливу решітку (6), трапецієвидний вимірювальний водозлив (7), затвор (11) та шпигувальний затвор (14), резервуар для відводу води (13), після чого по системі трубопроводів знову поступала в приймальний резервуар насосної станції.

Для зміни глибини води та створення підтоплення в нижньому б'єфі експериментальної установки в кінці лотка використовується затвор та дерев'яні бруски у вигляді шпигувального затвора в кінці лотка (рис. 5).



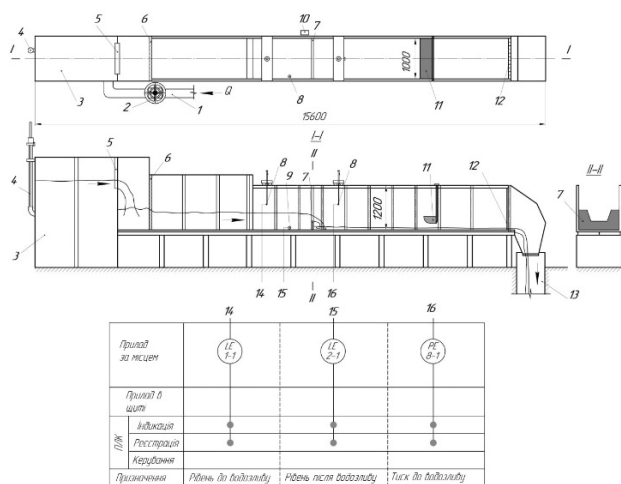


Рисунок 5 – Функціональна схема лабораторної установки: 1 – підвідний трубопровід, 2 – засувка, 3 – голова лотка, 4 – п'єзометр для визначення напору на трикутному водозливі, 5 – вимірювальний трикутний водозлив, 6 – заспокійлива решітка, 7 – трапецієвидний вимірювальний водозлив, 8 – датчики рівня води, 9 – датчик тиску, 10 – контролер, 11 – затвор для регулювання глибини в лотку, 12 – шпигцевий затвор, 13 – резервуар для відведення води, 14 – давач відстані до води перед водозливом, 15 – давач відстані до води за водозливом, 16 – давач тиску



Рисунок 6 – Фото експериментальної установки для визначення ефекту підтоплення для водозливів, розташованих на Канівській ГЕС

Автоматичне вимірювання рівня води в лабораторній установці проводиться наступним чином: при зміні рівня води в лабораторній установці давач, який підключено до аналогового входу модуля розширення надсилає сигнал 4...20 мА (в залежності від наповнення резервуару) про відстань до води для контролера. Який перетворює його в цифрове значення та висвітлюється на екрані.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

За допомогою автоматизованої вимірювальної системи в лабораторних умовах було проведено гідравлічне моделювання трапецієвидного водозливу, який працює в підтопленому режимі наступним чином.

- В дослідах ширина порогу водозливу була постійною і становила 20,00 см.
- Фіксувалося значення витрати води на установці  $Q_{\Delta}$  за допомогою трикутного водоміру, розташованим на початку експериментальної

установки

(рис. 5).

- Створювався підтоплений режим роботи трапецієвидного водоміра в нижньому б'єфі за допомогою різних типів затворів.
- Рівень води перед греблею ( $\downarrow ВБ$ ) та рівень води після греблі ( $\downarrow НБ$ ) вимірювався після формування усталеного потоку в лотку.
- Глибину нижче греблі збільшували декілька разів при тій самій витраті води в лотку  $Q_{\Delta}$ . Для кожної глибини вимірювались нові значення  $\downarrow ВБ$  та  $\downarrow НБ$ .
- Витрата води  $Q_{\Delta}$  змінювалась і всі операції повторювались.
- На основі вимірних даних було розраховано напір  $H$ , глибину підтоплення  $h_{п}$  трапецієвидного водоміра та витрату води  $Q_{трап}$  за формулою:

$$Q = 0,00186BH^{3/2} \quad (5)$$

де  $B$  – ширину порога,  $H$  – напір.

- Знайдена різниця між фактичною витратою на установці та вимірною за допомогою трапецієвидного водоміра  $\Delta Q$ .

Всі виміряні та розраховані параметри наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень визначення ефекту підтоплення на пропускну здатність трапецієвидного водоміру з шириною порогу 20,0 см

$Q_{\Delta}$ , дм <sup>3</sup> /с	$\downarrow ВБ$ , см	$\downarrow НБ$ , см	$H$ , см	$h_{п.}$ , см	$Q_{трап}$ , дм <sup>3</sup> /с	$\Delta Q$ , дм <sup>3</sup> /с
1	2	3	4	5	6	7
11.83	30.04	0	10.04	0	11.83	0
	30.25	21.07	10.25	1.07	12.12	0.29
	30.38	22.27	10.38	2.27	12.43	0.6
	30.79	23.99	10.79	3.99	13.14	1.31
	31.66	26.92	11.66	6.92	14.85	3.02
	34.68	33.05	14.68	13.05	20.92	9.09
	35.54	34.56	15.54	14.56	22.86	11.03
	37.27	36.68	17.27	16.68	26.68	14.85
18.53	43.81	43.39	23.81	23.39	43.31	31.48
	33.54	0	13.54	0	18.53	0
	34.23	25.77	14.23	5.77	19.94	1.41
	35.26	28.38	15.26	8.38	22.09	3.56
	35.93	30.94	15.93	10.94	23.64	5.11
	36.24	31.68	16.24	11.68	24.72	6.19
	37.79	34.98	17.79	14.98	28.02	9.49
	40.26	38.79	20.26	18.79	34.03	15.5
31.44	42.06	40.92	22.06	20.92	38.54	20.01
	46.27	46.15	26.27	26.15	49.97	31.44
	39.26	0	19.26	0	31.44	0
	39.28	22.96	19.28	2.96	31.66	0.22
	40.44	30.55	20.44	10.55	34.39	2.95

41.53	34.05	21.53	14.05	37.05	5.61
43.93	39.9	23.93	19.9	43.5	12.06
46.26	43.02	26.26	23.02	50.09	18.65
47.35	44.47	27.35	24.47	53.03	21.59
49.37	47.97	29.37	27.97	59.45	28.01

Аналіз даних таблиці 2 показав, що значення витрат води, виміряні за допомогою трикутного та непідтопленого трапецієвидного водоміра, близькі між собою. Характерно, що різниця між витратою води підтопленого трапецієвидного водоміра, розрахованою за формулою (5), і витратою води непідтопленого трапецієвидного водоміра (див. стовпчик 7 в табл. 2) зростає зі збільшенням глибини підтоплення водоміра (рис. 7).

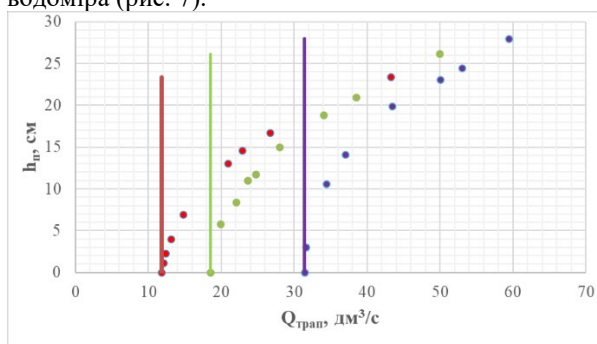


Рисунок 7 – Вплив глибини підтоплення на пропускну здатність трапецієвидного водоміра:

— витрата непідтопленого трапецієвидного водоміра,  
● – витрата підтопленого трапецієвидного водоміра

У випадку наявності підтопленого режиму водоміра робота із визначення його витрати зводиться до виконання таких операцій.

Шляхом безпосередніх вимірювань визначають  $H$  на порозі водоміру, а також глибину підтоплення  $h_p$  з боку нижнього б'єфу (див. рис. 4). Загальна залежність витрати підтопленого трапецієвидного водоміра має такий вигляд:

$$Q = m\sigma_n B \sqrt{2gH^{3/2}}, \quad (6)$$

де  $m=0,42$  – витратний коефіцієнт,  
 $\sigma_n$  – коефіцієнт підтоплення (див. нижче),  
 $B$  – ширина порогу водоміра,  
 $g=9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння,  
 $H$  – напір на порозі водоміра.

У формулі (6) використані величини мають такі розмірності:  $[Q] = \text{м}^3/\text{с}$ ;  $[B] = \text{м}$ ;  $[g] = \text{м/с}^2$ ;  $[H] = \text{м}$ .

Відомо, що коефіцієнт підтоплення трапецієвидних водомірів Чіполетті визначається такою залежністю:

$$\sigma_n = f\left(\frac{h_p}{H}\right) \quad (7)$$

З таблиці 2 видно, якщо не враховувати вплив коефіцієнта підтоплення, то розраховані значення витрати за формулою (2) будуть набагато перевищувати реальні значення. При цьому, найбільше відхилення спостерігається при невеликих витратах і сягало більше 270%.

Таким чином, загальна крива  $\sigma_n=f(h_p/H)$  для трапецієвидних водозливів, зображена на рис. 8.

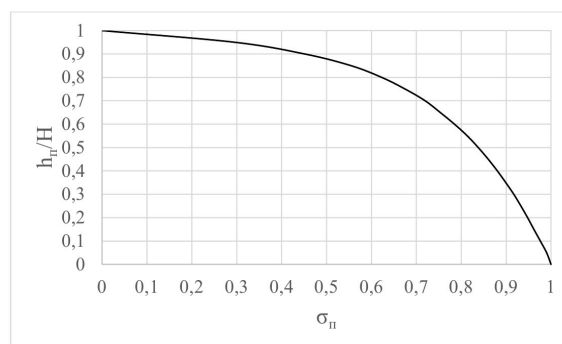


Рисунок 8 – Крива  $\sigma_n=f(h_p/H)$  для трапецієвидних водозливів з шириною порогу – 20см.

З врахуванням наведеною інформації остаточно розрахована залежність пропускну здатності підтоплених трапецієвидних водомірів матиме вигляд:

$$Q = 1,86B\sigma_n H^{3/2} \quad (8).$$

## V. ВИСНОВКИ

1. Формула (2) для визначення витрати трапецієвидного водозливу без врахування ефекту підтоплення дає похибку до 270% у розглядуваному діапазоні витрат.

2. Для отримання достовірних значень витрат трапецієвидних водомірів, які працюють в підтопленому режимі, необхідно враховувати ефект підтоплення.

3. Рекомендується визначити витрату на трапецієвидних водомірах за формулою (8), яка враховує ефект підтоплення водомірів з боку нижнього б'єфу.

4. Коефіцієнт підтоплення трапецієвидних водомірів можна визначити за кривою  $\sigma_n=f(h_p/H)$ , показаною на рис. 8.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] ДБН 13.2.4-2:2014 Греблі з ґрунтових матеріалів. Основні положення. – К. – 2014.
- [2] ДБН 13.2.4-3:2010 Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення. К., Міністерство регіонального розвитку і будівництва України. 2010. 40 с.
- [3] ДБН В. 1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. К. 2018.
- [4] ДБН В.2.4-3:2010 Гідротехнічні споруди. Основні положення - К., 2011. 39 с.
- [5] Korn, G. A. and Korn, T. M., Mathematical Handbook for Scientists and Engineers, 2nd Edition, Dover Publications, New York, 2000.
- [6] Boiten W. Flow measuring structures. Rapport. Landbouwniversiteit, Vakgroep Waterhuishouding; No. 42, 1993, 27 p.
- [7] Description of Ultrasonic sensor UB800-18GM40-I-V1 [https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/classid\\_186.htm?view=productdetails&productid=39580](https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/classid_186.htm?view=productdetails&productid=39580).
- [8] Справочник по гидравлике. Под ред. Большакова В.А. К.: Вища школа. 1984. 343

# Дністровський багатоцільовий комплексний енерговузол

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.026>

Вадим Крайник  
ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»,  
Харків, Україна  
e-mail kvya09@ukr.net

Юрій Ландау.  
ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»,  
Харків, Україна

Олександр Шевчик  
ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»,  
Харків, Україна  
e-mail 19shef81@ukr.net

**Анотація** – Розглянуто створення на базі існуючої Дністровської ГЕС потужністю 0,7 млн.кВт та Дністровської ГАЕС потужністю 2,27 млн.кВт з введеними 4 агрегатами потужністю 1,3 млн.кВт, будівництво якої продовжується, багатоцільового комплексного енерговузла з включенням до його складу: насосної станції загальною потужністю 220 МВт з 10 насосними агрегатами потужністю по 22 МВт біля Дністровської ГЕС, плавучої СЕС потужністю 100 МВт на верхній водоймі Дністровської ГАЕС та СЕС потужністю 10 МВт на відведеній землі вздовж дамби, а також розміщеної вздовж верхньої водойми дамби на відведеній землі ВЕС потужністю 100 МВт.

Такий Дністровський багатоцільовий комплексний енерговузол загальною потужністю біля 3,2 млн.кВт при широкому діапазоні регулювання, високій гнучкості і маневреності потужностей підвищить надійність роботи ОЕС України, забезпечить балансування електроенергії та надання допоміжних послуг енергосистемі, а в умовах інтеграції ОЕС України з європейською енергосистемою, з єдиним енергоринком зможе експортувати в країни ЄС найбільш потрібну і дорогу з великою додатковою вартістю високоманеврову електроенергію та допоміжні послуги.

**Ключові слова** – ГЕС, ГАЕС, СЕС, ВЕС, енерговузол, ОЕС, ВДЕ.

## I. ВСТУП

У XXI столітті в умовах різкої зміни тренду розвитку світової електроенергетики на основі принципів енергоефективності, енергобезпеки та низьковуглецевої енергетики з переходом на прискорений розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), в першу чергу, ВЕС (вітрових електростанцій) і СЕС (сонячних електростанцій) з нестійким виробітком електроенергії, відбувається різка зміна структури генеруючих потужностей об'єднаних енергосистем (ОЕС) з різким збільшенням потужностей балансуємих джерел.

Згідно з звітом Rocki Mountain Institute з США ВЕС і СЕС до 2030 р. будуть забезпечувати 33% світового виробітку електроенергії в порівнянні з біля 12% зараз.

Приєднання України до нової стратегії розвитку ЄС «Європейської зеленої угоди «EU Green Deal», інтеграція ОЕС України з європейською ENTSO-E, реальна перспектива членства в ЄС, економічна та технологічна підтримка ЄС та США дають можливість, ґрунтуючись на сучасних технологіях, створити потужну економіку на базі оновленого електроенергетичного комплексу.

При цьому слід врахувати істотні зміни, пов'язані з війною з російським агресором, з необхідністю підвищення енергетичної безпеки, перенесенням значної кількості підприємств зі східних та південних регіонів у західні, де буде відбуватись прискорений розвиток економіки та електроенергетики.

Війна показала, що електроенергетика важливіша, ніж галузь економіки, бо від неї, та її надійності, залежить виживання під час війни.

Інтеграція в березні 2022 р. ОЕС України з ENTSO-E створила нові умови її роботи, підвищення надійності, а також можливість збільшення експорту електроенергії в країни ЄС.

Слід відзначити велику роль взаємодії під час війни з ENTSO-E для забезпечення стабілізації ОЕС України, яка зазнала великих втрат.

Саме енергетична безпека стала додатково сильною мотивацією прискорення введення потужностей з ВДЕ, в першу чергу СЕС та ВЕС. За даними міжнародного енергетичного агентства в найближчі п'ять років ВДЕ потіснять вугілля та газ і стануть найбільшим в світі джерелом енергії.

В прийнятій під час війни новій «Енергетичній стратегії України на період до 2050 р.» передбачається в умовах енергетичного переходу корінна зміна структури генеруючих потужностей в електроенергетиці, з використанням інноваційних технологій, де атомна енергетика залишиться основою ОЕС з поступовим зменшенням потужностей ТЕС та швидким зростанням потужностей ВДЕ, на які припадає основний виробіток електроенергії, з регулюванням системи,





## Modeling, control and information technologies – 2024

- Загальну встановлену потужність в генераторному режимі 3190 МВт, в тому числі:

- високоманеврову потужність ГАЕС та ГЕС 2970 МВт;

- потужність СЕС та ВЕС 210 МВт;

- Потужність акумуляторної установки 10 МВт.

- Загальний річний виробіток електроенергії 5,1 млрд.кВт·год, в тому числі:

балансуючу, а також пікову електроенергію ГАЕС та ГЕС 4,68 млрд.кВт·год.

- Загальну встановлену потужність в насосному режимі двигуна 3177 МВт, в тому числі:

ГАЕС 2947 МВт;

- насосна станція 220 МВт;

- акумуляторна установка 10 МВт.

- Загальні річні витрати електроенергії 4,8 млрд.кВт·год, в тому числі:

- ГАЕС 4,28 млрд.кВт·год;

- насосна станція 0,52 млрд.кВт·год.

### III. ВИСНОВКИ

1. На Дністровському енерговузлі з ГАЕС і ГЕС, з існуючою енергетичною, технологічною і будівельно-господарською інфраструктурою є передумови для подальшого розвитку з включенням до його складу насосної станції, плавучої і наземної СЕС і ВЕС та акумуляторної установки зі створенням єдиного в Європі унікального потужного багатоцільового комплексного енерговузла, технологічно об'єднавши в ньому всі основні види генерації ВДЕ: ГЕС, ВЕС, СЕС, та регулюючі потужності ГАЕС і насосної станції та акумуляторної установки.

Загальна встановлена потужність такого енерговузла становить 3190 МВт (в режимі двигуна 3177 МВт), з загальним річним виробітком електроенергії 5,1 млрд.кВт·год, в тому числі: балансуючої та пікової ГЕС та ГАЕС – 4,68 млрд.кВт·год, електроенергії СЕС та ВЕС – 0,43 млрд.кВт·год;

2. Створення на базі Дністровської ГАЕС та ГЕС потужного багатоцільового комплексного енерговузла дає суттєві техніко-економічні та екологічні переваги:

- використання існуючої будівельної та транспортної інфраструктури при будівництві;

- експлуатація в складі енерговузла з єдиною системою управління, експлуатації, видачі потужності з використанням існуючої технологічної інфраструктури, ЛЕП;

- підвищення енергетичної безпеки при розосередженому розміщенні потужностей ВЕС,

СЕС та акумуляторної установки з забезпеченням і підвищенням надійності власних потреб;

- балансування електроенергії СЕС та ВЕС всередині енерговузла та видача потужності в ОЕС згідно з диспетчерським графіком;

- збільшення діапазону регулювання, з забезпеченням високої гнучкості та маневреності, завдяки включенню насосної станції до складу енерговузла;

- зменшення перетоків та витрат електроенергії в ЛЕП;

- оптимізація спільної роботи з підвищенням ефективності та зменшенням експлуатаційних витрат;

- в цілому підвищення фінансової ефективності.

До екологічних переваг відносяться:

- збільшення виробітку «зеленої» енергії на 836 млн.кВт·год;

- економія біля 200 га земель, які треба було б відвести під ВЕС потужністю 100 МВт та СЕС потужністю 110 МВт;

- зменшення спалювання вугілля на ТЕС біля 350 тис.т та викидів CO<sub>2</sub> біля 720 тис.т за рік та інших забруднюючих речовин тільки за рахунок виробітку додаткової електроенергії ГЕС, ВЕС та СЕС;

- зменшення витрат води з поверхні верхньої водоїми на 1,2 млн. м<sup>3</sup> на рік.

3. Дністровський потужний багатоцільовий комплексний енерговузол при широкому діапазоні регулювання, високій гнучкості і маневреності потужностей підвищить надійність роботи ОЕС України, забезпечить балансування електроенергії та надання допоміжних послуг енергосистемі, а в умовах інтеграції ОЕС України з європейською енергосистемою, з єдиним енергоринком зможе експортувати в країни ЄС найбільш затребувану і дорогу з великою додатковою вартістю високоманеврову електроенергію та допоміжні послуги.

### Література

[1] Дністровський багатоцільовий комплексний енерговузол. Попередні проєктні напрацювання.



# Проект захоронення радіоактивних відходів мельницької АЕС в товщі вулканічних туфів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.027>

Віктор Мельничук

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[v.g.melnychuk@nuwm.edu.ua](mailto:v.g.melnychuk@nuwm.edu.ua)

Марія. Криницька

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[m.v.krynytska@nuwm.edu.ua](mailto:m.v.krynytska@nuwm.edu.ua)

Тетяна Басюк

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[t.o.basyuk@nuwm.edu.ua](mailto:t.o.basyuk@nuwm.edu.ua)

Діана. Косяк

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[d.s.kosiak@nuwm.edu.ua](mailto:d.s.kosiak@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – Пропонується використання товщі цеоліт-сметитових туфів нижнього венду, що залягають під Хмельницькою АЕС і мають задовільні ізоляційні властивості для захоронення радіоактивних відходів. Даний проект, за прикладом проектів захоронення РАВ в туфових товщах, які розробляються в США та Росії, може стати додатковою альтернативою намірам ізолювати РАВ від екосистеми в Чорнобильській зоні відчуження і прилеглий частині Коростенського гранітного плутону.

**Ключові слова** – вулканічні туфи; базальти; нижній венд; бабинська світа; АЕС; радіоактивні відходи.

## I. ВСТУП

Енергоатом вирішив остаточно відмовитися від вивезення відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) з українських АЕС на переробку та тимчасове зберігання до російської Федерації. У зв'язку з таким рішенням нагальним завданням сьогодення став пошук об'єктів для довгострокового зберігання довгоіснуючих та високоактивних радіоактивних відходів та їхнього місцевого захоронення в глибоких геологічних формаціях, що відповідають чинним вимогам [1]. Найперспективнішими в цьому відношенні є масиви вулканічних туфів, поширених в надрах Волино-Поділля, котрі за прикладом вулканічних туфів гори Юкка (штат Невада) США [9], вибрані для захоронення радіоактивних відходів (РАВ) [3, 4],

За прикладом вулканічних туфів гори Юкка (штат Невада), котрі вибрані для захоронення РАВ у США, найперспективнішими в цьому відношенні є ті масиви туфів, котрі розміщені в зоні аерації підземних вод, або добре ізолювані водотривами. Виявлення і вивчення таких відносно сухих туфових масивів у Волино-Подільському регіоні має стати важливою задачею майбутніх інженерно-

геологічних досліджень і вимагає проведення комплексних інженерно-геологічних, гідрогеологічних та геофізичних вишукувань в туфових горизонтах на предмет безумовної надійності їх ізоляційних властивостей.

## II. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проект складений за результатами обстеження кар'єрів з видобутку базальтів та туфів у Рівненській та Хмельницькій областях, де останні виступають на поверхню, а також за даними колонкового буріння свердловин та всебічного вивчення речовинного складу і властивостей піднятого із них керну вулканічних туфів нижнього венду. Його метою є обґрунтування доцільності підземного захоронення РАВ в районі Хмельницької АЕС, як альтернативи намірам ізолювати РАВ від екосистеми серед гранітів Коростенського плутону неподалік Чорнобильської зони відчуження.

## III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

*Характеристика умов залягання, речовинного складу та властивостей нижньовендських туфів регіону*

Туфи, що розглядаються – це продукти гідротермально-метасоматичних перетворень вулканічного попелу, піску та тефроїдних вулканокластичних уламків від вивержень базальтової магми у ранньому венді, приблизно 600 млн. років тому. Разом з базальтами і лавокластичними утвореннями туфи складають трапову формацію (волинську вулканічну серію) нижнього венду, поширену в надрах і на докредовій поверхні у Волино-Подільському регіоні України. Туфи залягають шарами, формуючи на площі близько 200 тис. км<sup>2</sup> гігантський вулканокластичний покрив

потужністю до 210 метрів, відомий як бабинська світа [2-5].

*Туфова товща під промисловим майданчиком Хмельницької АЕС*

Туфова товща (бабинська світа нижнього венду – V1 bb) простежується у Волино-Подільському регіоні під крейдою у вигляді смуги шириною 1-10 км на глибинах від 5 до 250 м, звідки поступово занурюється на захід до глибин понад 4 км. В межах цієї смуги розміщені Хмельницька АЕС. Під нею туфи залягають в інтервалі глибин 30-150 м.. На денну поверхню туфи виступають лише в 5 км на південний схід від м. Славута Хмельницької обл. в кар'єрі Ташки та в базальтових кар'єрах Рівненщини поблизу с. Берестовець, с. Мидськ, с. Базальтове, с. Іванчі.

Територія розповсюдження туфів в цілому відповідає Волино-Подільській плиті, яка стабільно розвивалась в пасивному геодинамічному режимі принаймні впродовж останніх 100 млн р. Непорушені розломами тіла туфів за площею становлять десятки і сотні км<sup>2</sup> та мають потужність до 210 м. На більшій території регіону досліджувана товща перекрита численними покривами (до семи) базальтів та потужним (до 4 км) чохлам осадових гірських порід, серед яких наявні численні шари з надійними ізоляційними властивостями.

Попередня оцінка інженерно-геологічних умов залягання туфової товщі Волино-Поділля, виконана за даними документації і каротажу 1880 свердловин показує їхню високу потенційну придатність для захоронення РАВ в широкому діапазоні глибин на абс. позн. від + 233 до -3740 м.

Структура цеолітів в туфах така, що вони мітять відкриті канали, в котрі поселяються сорбовані речовини, в тому числі радіоактивні. Переважання цеолітів та смектитів в туфах обумовлює їхні задовільні адсорбційні та іонообмінні властивості, що відкриває можливості їхнього використання в екологічно-чистому виробництві [2] в галузі водоочищення [2; 6].

За результатами випробовувань фізико-механічних властивостей вулканічні туфи регіону відносяться до різновиду напівскельних ґрунтів. Межа міцності при стисканні в повітряно-сухому стані в середньому становить 400 кгс/см<sup>2</sup>. При обпаленні в інтервалі температур 1000-1100°С водопоглинання туфів зменшується до 5%, а при 1150-1200 °С вони плавляться з утворенням міцних керамічних мас, в яких межа міцності на одноосове стиснення сягає 2500 кгс/см<sup>2</sup>.

Для туфів характерні переважно міжзернові деформації, а тріщини, як правило, швидко заліковуються вторинними мінералами: смектитами, карбонатами і хлоритами. По цій причині туфи Волино-Поділля загалом слабководопроникні породи. За даними пробних відкачок підземних вод із свердловин в приповерхневих умовах інтенсивного водообміну

вони мають коефіцієнт фільтрації 0,1-0,25 м/добу, а в зоні сповільненого водообміну на значних глибинах - не більше 0,005 м/добу.

Туфова товща нижнього венду під промайданчиком Хмельницької АЕС залягає в інтервалі глибин 30-150 м і має потужність 127 м – достатню для розміщення в ній могильника РАВ (рис. 1, рис. 2). Вона надійно ізольована від поверхневих і ґрунтових вод стометровою товщею водотривких вулканоміктових відкладів (за участю аргілітів) могилів-подільської серії верхнього венду. Поблизу с. Ташки Шепетівського району туфова товща виступає на поверхню у пагорбах з абсолютними позначками і розробляється кар'єрами як адсорбційна сировина. Туфова товща тут залягає в зоні аерації ґрунтових вод і може розглядатись як об'єкт приповерхневого захоронення РАВ [2 -5].

Туфи, що видобуваються поблизу с. Ташки Шепетівського району і розкриті в базальтових кар'єрах Рівненщини, завдяки їхнім адсорбційним властивостям по відношенню до радіоізотопів та важких металів доцільно використовувати для створення запасів дезактивуючих силікатних матеріалів на випадок аварій та військових дій. Досліджено можливість використання сапонітових та сапоніт-анальцимових різновидів туфів, які було відібрано із керну свердловин поблизу с. Радощівка Хмельницької області (Україна), для зниження кислотності підземних вод та вилучення із них іонів важких металів Mn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> [7].

Ділянка характеризується простими гідрогеологічними умовами (рис. 1). В долині р. Горинь повсюдно набув поширення перший від поверхні водоносний комплекс (ґрунтові води) у сучасних і верхньоплейстоценових алювіальних (річкових) за участю болотних відкладах заплави та першої надзаплавної тераси, складений пісками, жовтуватими-сірими, дрібно- і середньозернистими, часто з прошарками суглинку. За межами річкової долини поширені еолово-делювіальні леси та лесовидні суглинки середнього плейстоцену. Потужність четвертинних відкладів сягає 15,0 м.

Вехньоплейстоценові алювіальні відклади, на яких розміщені промайданчик Хмельницької АЕС та м. Нетішин, залягають на водотривких аргілітах холоневичької світи в складі могилів-подільської серії верхнього венду. Останні часто слугують основами для промислових споруд АЕС.

Нижче залягає потужна (120-170 м) товща слабководопроникних цеоліт-смектитових туфів бабинської світи нижнього венду з товщею водотривких туфоаргілітів в основі (рис. 2). Наявність цього потужного водотриву забезпечує добру ізоляцію напірних міжпластових підземних вод в нижчезалягаючих пісковицях і гравелітах горбашівської світи нижнього венду і пісковицями польської серії рифею від забруднення і виснаження.

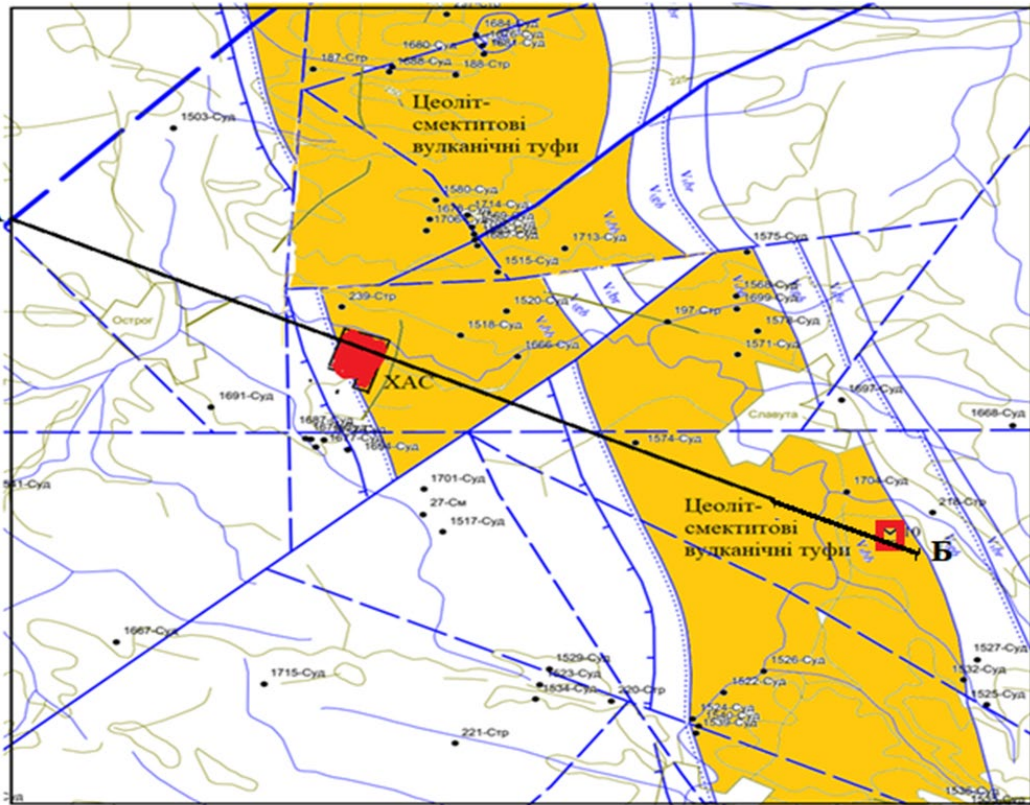


Рис. 1. Поширення туфової товщі на докрейдовому зрізі в районі Хмельницької АЕС : 1 - туфова товща нижнього венду , 2 – свердловини, що її розкрили, 3 – кар'єр з видобутку туфів поблизу с. Ташки

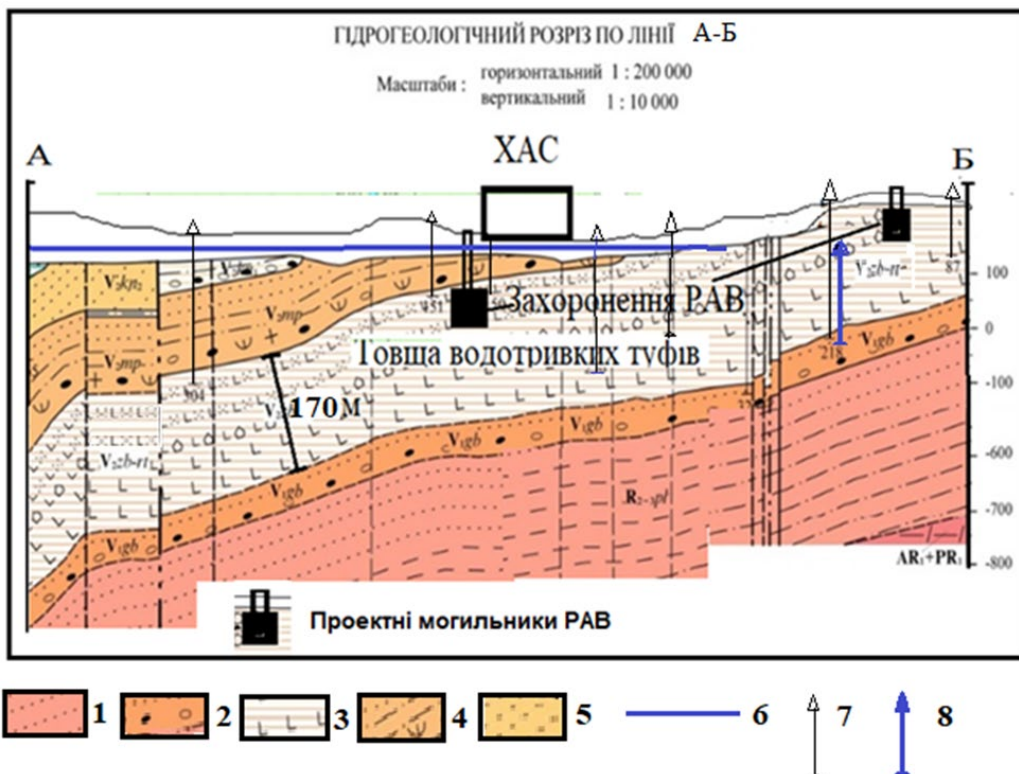


Рис. 2. Схема розміщення могильників РАВ в геологічному розрізі під промайданчиком Хмельницької АЕС та в кар'єрі сапонітових глин поблизу с. Ташки Шепетівського району: 1- водонасні пісковики польської серії рифею; 2 – водонасні пісковики і гравеліти горбашівської світи нижнього венду; 3 – слабводопроکنі цеоліт-сметитові туфи і водотривкі туфоаргіліти бабинської світи нижнього венду; 4 - водотривкі вулканоміткові аргіліти холоневицької світи верхнього венду; 5 - водонасні пісковики канилівської серії верхнього венду; 6 – дзеркало ґрунтових вод; 7 – свердловина та її глибина; 8 – напір води в свердловині

IV. ВИСНОВКИ

Таким чином, проект використання товщі цеоліт-сметитових туфів нижнього венду, що залягають під Хмельницькою АЕС і мають задовільні ізоляційні властивості для захоронення радіоактивних відходів, відповідає вимогам МАГАТЕ щодо економічної доцільності і надійності ізоляції РАВ. Дана товща є складовою осадового чохла Волино-Подільської плити, що розвивалась в пасивному геодинамічному режимі впродовж сотень мільйонів років. Непорушені розломами ділянки туфової товщі за площею становлять десятки і сотні км<sup>2</sup> та мають потужність до 210 м. Цеоліт-сметитові вулканічні туфи, якими вона складена в приповерхневому заляганні, мають низьку водопроникність, яка на значних глибинах в зоні сповільненого водообміну стає мінімальною.

Адсорбційна здатність досліджуваних туфів по відношенню до радіоактивних ізотопів, позитивні інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови території могильника РАВ та інші чинники відповідають вимогам та правилам довгострокового зберігання довгоіснуючих та високоактивних радіоактивних відходів до їх захоронення в глибоких геологічних формаціях [1].

Даний проект, за прикладом проектів захоронення РАВ в туфових товщах, які розробляються в США та росії, може стати додатковою альтернативою намірам ізолювати РАВ від екосистеми в Чорнобильській зоні відчуження і прилеглий частині Коростенського гранітного плутону.

Для успішної реалізації наміченого проекту необхідно виконати інженерно-геологічні вишукування під будівництво об'єктів глибокого захоронення РАВ в туфівій формації Волино-

Подільського регіону на предмет безумовної надійності її ізоляційних властивостей.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Вимоги та правила довгострокового зберігання довгоіснуючих та високоактивних радіоактивних відходів до їх захоронення в глибоких геологічних формаціях / Наказ Державного комітету ядерного регулювання України 07.12.2007 N 169.
- [2] Мельничук В.Г., Мельничук Г.В., Поліщук А.М. Застосування цеоліт-сметитових туфів Волино-Поділля у екологічно-чистому виробництві. Записки Українського мінералогічного товариства. 2016, том 13. С. 83-87.
- [3] Мельничук В. Г., Поліщук А.М., Мельничук Г.В. Вулканічні туфи в трапах Волино-Поділля як альтернативний об'єкт для захоронення радіоактивних відходів. Зб. наук. пр. : Наукові праці Інституту фундаментальних досліджень. К. : Логос. 2007. Вип. 12. С. 162-168.
- [4] Мельничук В.Г. Оцінка придатності туфової товщі в нижньовендських трапах Волино-Подільської плити для захоронення радіоактивних відходів. *Вісник КНУ ім. Т. Шевченка*. Геологія. Вип. 49. 2010. С. 55-57.
- [5] Мельничук В. Г. Товща цеоліт-сметитових туфів в нижньовендських трапах південно-західної частини Східноєвропейської платформи, їх походження та перспективи використання. Зб. наук. пр. ІГН НАН України: Сучасні проблеми літології та мінералогії осадових басейнів України та суміжних територій. К. : 2008. С. 104-112.
- [6] Мельничук В.Г., Трач Ю.П., Косінов В.П., Міхель М., Речек Л. Дослідження мінерального складу і можливостей використання диспергованих базальтів та туфів Івано-Долінського родовища Рівненської області в галузі водоочищення. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. 2018, №30. С. 36-47.
- [7] Trach Yuliia, Melnychuk Victor, Michel Magdalena Maria, Reczek Lidia. Tadeusz Siwiec 4 and Roman TracThe Characterization of Ukrainian Volcanic Tuffs from the Khmelnitsky Region with the Theoretical Analysis of Their Application in Construction and Environmental Technologies // *Materials* 2021, 14, 7723 p.1-19.

# Роль гідроенергетики в роботі об'єднаної енергетичної системи України в сучасних умовах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.028>

Віктор Мошинський

Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне  
v.s.moshynskyi@nuwm.edu.ua

Юрій Бондаренко

ТОВ «Науково-технічна компанія ЕНПАСЕЛЕКТРО», Київ  
enpas@enpaselektro.com

Олександр Рябенко

Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне  
o.a.riabenko@nuwm.edu.ua

Володимир Тимошук

Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне  
v.s.tymoshchuk@nuwm.edu.ua

Оксана Клюха

Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне  
o.o.kluha@nuwm.edu.ua

**Анотація** – Розглядається питання про роль гідроенергетики в роботі Об'єднаної енергетичної системи України в сучасних умовах. Наводиться інформація про структуру електрогенеруючих потужностей Європейського Союзу, Франції, Німеччини та України. Висвітлюється робота енергетичної системи України в умовах ведення бойових дій, а також вплив війни Росії проти України на розвиток світової енергетики.

**Ключові слова** – блекаут, гідроаккумулявальна електростанція, гідроенергетика, елегазові вимикачі, енергетична система.

## І. СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Для забезпечення функціонування економіки, благополуччя населення та енергетичної, економічної і політичної залежності держави використовують наявні джерела виробництва електричної енергії – атомні, теплові, гідравлічні, вітрові, сонячні електростанції, станції на біопаливі та ін.

Як відомо, графік споживання електричної енергії протягом доби характеризується великою нерівномірністю. Досить часто регулювання цієї нерівномірності здійснюють за допомогою базових блоків теплових електростанцій потужністю 200 - 300 МВт. Для проходження нічних провалів у добовому графіку навантажень іноді доводиться виводити з роботи окремі блоки ТЕС. Таке регулювання є досить дорогавартісним прийомом та призводить до суттєвих поломок і виходу з ладу обладнання теплоелектростанцій. Враховуючи вказані обставини, регулювання роботи енергетичних систем прагнуть здійснювати за допомогою агрегатів ГЕС і ГАЕС, які

характеризуються високою маневреністю та малою тривалістю часу пуску агрегатів у роботу.

Таблиця 1. Установлена потужність гідравлічних електричних станцій та виробіток ними електричної енергії у районах світу в 2021 р.

Регіони	Установлена потужність гідравлічних електростанцій (включаючи ГАЕС) МВт	Приріст установлені потужності гідравлічних електростанцій (включаючи ГАЕС) у 2021р. МВт	Річний виробіток електричної енергії ТВт-год	Установлена потужність ГАЕС МВт
Північна і Центральна Америка	205058	1156	702	22089
Південна Америка	176773	172	614	994
Європа	254901	1087	689	55050
Південна і Центральна Азія	162313	1961	538	7711
Східна Азія і країни Тихого океану	522891	21897	1939	75540
Африка	38469	182	146	3377
<b>Всього</b>	<b>1360405</b>	<b>26455</b>	<b>4252</b>	<b>164761</b>

Аналіз світових тенденцій розвитку енергетики показує, що в останні десятиріччя суттєво зросла роль гідроенергетики в забезпеченні роботи енергетичних систем. Установлена потужність гідравлічних електростанцій та виробіток електричної енергії в регіонах світу станом на



2021 р. наведені в табл. 1 [1,2]. При аналізі інформації, представленої в табл. 1, важливо звернути увагу на приріст у 2021 р. установленої потужності гідравлічних електростанцій, а також на значимість установленої потужності ГАЕС.

II. ЗМІНА СТРУКТУРИ ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ УКРАЇНИ В УМОВАХ БОЙОВИХ ДІЙ

Структура електрогенеруючих потужностей Європейського Союзу Франції, Німеччини станом на 2019 р., а також України за період 2019-2022 рр. показана у табл. 2 [3-7].

Таблиця 2. СТРУКТУРА ГЕНЕРУЮЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ЕС, Франції, Німеччини та України

Країни	Тип електростанції			
	Виробіток електроенергії у відсотках			
	АЕС	ТЕС	ГЕС, ГАЕС	ЕС вітрові, сонячні, біоенергія
ЕС, 2019	25,5	39,9	10,8	23,8
Франція, 2019	70	9	10	11
Німеччина, 2019	12	46	4	38
Україна, 2019	53,9	37,4	5,1	3,6
Україна, 2022	60,1	34,86	1,95	3,09

В умовах ведення бойових дій структура генеруючих потужностей України зазнала суттєвих змін. Російські загарбники захопили Запорізьку АЕС, потужністю 6000 МВт (6 x 1000 МВт), підірвали Каховську ГЕС, потужністю 334,8 МВт – 6 x 55,8 МВт (рис. 1), пошкодили ряд ТЕС і ГЕС, а також велику кількість електростанцій, трансформаторів, розподільчих мереж. При цьому було пошкоджено біля половини енергетичних потужностей, втрачено 90 % вітрової та третина сонячної генерації.



Рис 1. Фото зруйнованої Каховської ГЕС

Внаслідок серйозних пошкоджень російськими агресорами енергетичної системи України 23 листопада 2022 р. відбувся тимчасовий блекаут з відключенням більшої частини країни від постачання електричної енергії. В умовах зниження частоти в енергосистемі спрацював аварійний захист і були відключені всі блоки Рівненської, Південноукраїнської та Хмельницької атомних станцій, а Запорізька АЕС перейшла в режим повного блекауту із запуском всіх дизель-генераторів. Українські енергетики з честю вийшли із такої загрозливої ситуації і за 20 годин вивели

країну із блекауту. Описаний випадок свідчить про високу стійкість української енергосистеми.

У 2023-2024 рр. Росія здійснила нові терористичні спроби знищення енергетичної системи нашої держави (підкреслимо, що такі дії класифікуються як терористичні акти, адже Росія не оголошувала стану війни з Україною). Внаслідок таких дій зазнали великих руйнувань і виведені з експлуатації Дніпрогес-1, Дніпрогес-2, Середньодніпровська, Канівська та інші гідроелектростанції. Були пошкоджені і виведені з ладу Зміївська, Трипільська, Ладижинська теплові електростанції. Значних руйнувань зазнали і інші енергетичні елементи – трансформаторні підстанції, розподільчі системи, лінії електропередач тощо. Проте повністю вивести з ладу енергетичну України загарбникам так і не вдалося.

III. РОБОТА ОБ'ЄДНОАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ В СУЧАСНИХ УМОВАХ В НАЯВНОСТІ БОЙОВИХ ДІЙ

Великі руйнування та пошкодження елементів енергетичної інфраструктури України, спричинені російськими масштабними ракетними атаками та системними обстрілами, потребують швидкого реагування та прийняття відповідних заходів для відновлення електропостачання. До числа таких екстрених заходів необхідно віднести наступні.

1. Ремонт та відновлення пошкоджених електростанцій і елементів енергетичної інфраструктури – трансформаторів, розподільчих пристроїв, ліній електропередач, вимикачів, роз'єднувачів та іншого обладнання.
2. Використання існуючих та створення нових додаткових (обхідних) мереж електропостачання.
3. Передача в аварійні райони електричної енергії із сусідніх регіонів, в тому числі із закордонних джерел.
4. Використання в аварійних ситуаціях промислових і побутових бензинових та дизельних електрогенераторів, а також теплових насосів. Наразі в Україну вже завезено понад пів-мільйона електрогенераторів.

Складність проблеми полягає в тому, що значний обсяг зазначених робіт доводиться виконувати під ворожими обстрілами та за наявності мінувань, причому воєнна ситуація не виключає можливості подальших ворожих ракетних атак та обстрілів.

Відбудова енергетичної системи України відбувається з використанням допомоги міжнародних партнерів, які надали додаткове фінансування та енергетичне обладнання, включаючи потужні трансформатори та електрогенератори. При цьому відновлення енергетичної системи здійснюється на новій основі за сучасними європейськими стандартами з врахуванням існуючих військових ризиків.

Необхідно підкреслити, що відновлення потужних електростанцій потребує не тільки ремонту, а в ряді випадків і повної заміни зруйнованого обладнання. Виготовлення нових

унікальних трансформаторів, генераторів, турбін та іншого гідроенергетичного обладнання вимагає великих затрат часу та відповідного фінансового забезпечення.

Кардинальними кроками для поліпшення стану енергетичної системи України та забезпечення її енергетичної незалежності став розрив енергетичного зв'язку між Україною та Росією і Білорусією, а також планова синхронізація національної системи з європейською енергомережею ENTSO-E. Енергетичний міст між Україною та Євросоюзом, який був відкритий у березні 2022 р. дав нашій країні можливість здійснювати необхідні експортно-імпорتنі операції з енергетичною енергією.

#### IV. Підвищення ролі ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ НАДІЙНОЇ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

У вирішенні енергетичних проблем, що виникають в Україні в умовах ведення бойових дій велику роль відіграє гідроенергетика. Агрегати ГЕС і ГАЕС не тільки виробляють електричну енергію, а ще й регулюють нерівномірності роботи енергетичної системи в часі. При цьому агрегати гідравлічних станцій виробляють гостро пікову енергію, яка у 6-8 разів дорожча від базової.

Позитивною рисою ГАЕС є можливість їх роботи у насосному режимі в періоди низького завантаження енергосистеми. При цьому використовується дешева базова енергія, яку виробляють АЕС і ТЕС. В останні десятиріччя проявилася тенденція істотного розширення функцій ГАЕС в енергосистемі. У доповнення до традиційних видів їх діяльності – виробництва гостро дефіцитної пікової електричної енергії появилась можливість задоволення зростаючих потреб енергоринку. До числа таких додаткових функцій ГАЕС необхідно віднести регулювання основних параметрів енергосистеми (потужності, частоти тощо), підвищення якості енергетичної енергії, створення резерву підтримки та відновлення частоти [2,7]. Останнім часом виявилася і ще одна важлива функція гідроаккумулятивних електростанцій, пов'язана з можливістю використання її для акумулювання «надлишкової» енергії генерованої вітровими і сонячними електростанціями. В Україні наразі діють три ГАЕС – Київська, Дністровська, Ташлицька, які демонструють надійну роботу.

Енергетичною стратегією України на період до 2035р. планується введення в експлуатацію третьої черги Дністровської ГАЕС у складі п'ятого – сьомого агрегатів потужністю 972 МВт, будівництво Канівської ГАЕС з встановленою потужністю 1000 МВт, розширення Ташлицької ГАЕС.

Серед названих станцій особливо необхідно виділити Дністровську ГАЕС (рис. 2). Це унікальний об'єкт. Після введення в експлуатацію всіх семи агрегатів загальна потужність станції досягне 2268 МВт в генераторному режимі та 2947 МВт у насосному. За цими показниками Дністровська ГАЕС займе перше місце в Європі та шосте в світі після ГАЕС Фенгнінг (Fengning, 3600

МВт, Китай), Бат Кунті ( Bath County, 3003 МВт, США), Канагава (Kanagawa, 2820 МВт, Японія), Хуейчжоу (Huizhou, 2448 МВт, Китай), Гуангдонг ( Guangdong, 2400 МВт, Китай). Агрегати Дністровської станції відносяться до числа самих великих у світі, є реверсивними і мають потужність 324 МВт в генераторному режимі і 421 МВт у насосному [2].



Рис. 2. Дністровська ГАЕС (вид зверху)

Для здійснення комутацій електричного струму у відкритих і закритих розподільчих пристроях ГЕС, ГАЕС енергетичних систем широко використовують елегазові вимикачі. Наприклад, на Київській ГЕС здійснено заміну п'яти блочних повітряних вимикачів напругою 110 кВ на елегазові типу HGF-111/1С фірми ALSTOM, а також встановлено 20 генераторних елегазових вимикачів напругою 6,3 кВ типу HGI-2 та HGI-3 фірми «ABB». У технічно розвинених країнах елегазові вимикачі високої і надвисокої напруги (110 – 1150 кВ) практично витіснили всі інші типи комутаційних апаратів [8].

В останні десятиріччя намітилася тенденція використання на ГЕС і ГАЕС потужних комплектих розподільчих установок з елегазовою ізоляцією (КРУЕ). При цьому використовується обладнання для напруги до 330-500 кВ змінного струму та до 1150-1500 кВ постійного струму. КРУЕ розміщують у закритих приміщеннях з виконанням усіх відповідних експлуатаційних вимог.

В умовах ведення бойових дій істотно зростає роль ГЕС та ГАЕС, які можуть швидко включатися у роботу в критичних ситуаціях, забезпечуючи високу стійкість енергетичної системи.

#### V. Вплив війни Росії проти України на розвиток СВІТОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Аналіз структури енергогенеруючих потужностей країн світу за останні десятиріччя показує динаміку змін цієї структури. Після аварії на атомних електростанціях Чорнобильській (Україна, 1986 р.) та Фукусіма (Японія, 2011р.) ряд країн прийняли рішення про зменшення виробництва електричної енергії на АЕС і навіть про повне закриття цих станцій.

У Німеччині на початок 2011 р. працювало 175 атомних реакторів, у кінці 2011 р. в роботі залишилося лише 9 реакторів, а в січні 2022 р. – тільки 3 АЕС потужністю 4 ГВт (Ізар 2, Емеланд та Некарвестгайм-2). Планувалося закриття цих станцій наприкінці 2022 р.[6].

Франція у 2024 р. прийняла рішення про скорочення на 50% долі АЕС у виробництві електричної енергії до 2025 р., причому на той час ця доля становила порядку 70%. Проте в подальшому реалізація цих планів була відкладена до 2035 р. [5].

Російсько-українська війна, введення санкцій проти Росії, закриття нафтопроводу «Північний потік-2», істотне зменшення імпорту до Європи російської нафти і газу, скачки світових цін на вказані енергоносії істотно вплинули на прийняті раніше рішення в галузі енергетики. Крім того вчені та громадськість багатьох країн прийшли до висновку, що атомні електростанції мають більш високий рівень надійності, ніж це вважалося раніше, а негативний вплив цих станцій на навколишнє середовище є набагато меншим, ніж електростанцій інших типів.

Враховуючи названі обставини, уряд Німеччини навіть в умовах значних успіхів у використанні нетрадиційних джерел енергії прийняв рішення про продовження на певний період роботи діючих трьох своїх АЕС. При цьому Німеччина активно використовує свої вугільні електростанції. Характерно, що наразі Німеччина відноситься до країн, які найбільше імпортують кам'яне вугілля [1]. Франція у лютому 2022 р. оголосила про плани будівництва шести нових атомних реакторів та розгляд питання про будівництво в подальшому іще восьми реакторів [5].

Важливою тенденцією розвитку світової енергетики є напрямок, пов'язаний з декарбонізацією галузі, тобто з поступовою відмовою від використання викопних видів палива (вугілля, нафти, газу тощо) та переходом до більш повного використання відновлюваних джерел (енергії води, сонця, вітру, біопалива, побутових відходів тощо). Ця тенденція пов'язана з прагненням зменшити негативний вплив людини на зміну клімату шляхом зменшення викидів вуглекислого газу, що утворюється при згоранні палива. За таких обставин Великобританія закрила свої вугільні шахти, а Франція у 2018 р. оголосила про закриття своїх вугільних електростанцій до 2022 р., хоча реалізація цього рішення була відкладена до 2035 р.

Програма розвитку енергетики держави висвітлена в Енергетичній стратегії України на період до 2035 р., яка була схвалена в умовах мирного часу ще в 2017 р. В умовах ведення бойових дій ця стратегія потребує внесення відповідних корективів, які можна звести до наступного: розосередження використовуваних джерел енергії, розширення мережі існуючих ліній електропередач, активне використання відновлюваних джерел енергії шляхом будівництва нових ГЕС і ГАЕС, вітрових, сонячних електростанцій та станцій на біопаливі, продовження співробітництва України і Європейського союзу в умовах синхронізації роботи української енергосистеми з європейською енергетичною мережею ENTSO-E та ін.

## ВИСНОВКИ

1. Вихід із блекауту в 2022 р. продемонстрував високу стійкість і надійність Об'єднаної енергетичної системи України.
2. Гідроенергетика відіграє велику роль у забезпеченні стійкості енергетичної системи України в умовах ведення бойових дій.
3. Продовжити співробітництво України та Європейського Союзу в умовах синхронізації роботи української енергосистеми з Європейською енергетичною мережею ENTSO-E з використанням можливостей експорту та імпорту електричної енергії.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Hydropower Status Report. Sector trends and insights. 2022. <https://www.hydropower.org/publications/2022-hydropower-status-report>
- [2] О.А. Рябенко, "Гідроелектростанції в особливих природно-кліматичних умовах" : підручник – Рівне: НУВГП, 2024. – 192 с. ISBN 978-966-327-595-6
- [3] Information on the share of each energy source used in the overall structure of the purchased electricity balance for 2022. <https://www.ez.rv.ua/informatsiya-shhodo-chastky-kozhnogo-dzherela-energiyi-yaka-bula-vykorystana-u-zagalnij-strukturalansu-kuplenoyi-elektrychnoyi-energiyi-za-2022-rik/>
- [4] The European Power Sector in 2019: Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition [https://www.agora-energiawende.org/fileadmin/Projekte/2019/Jahresauswertung\\_EU\\_2019/A-EW\\_EU-Annual-Report-2019\\_Slide-Deck.pdf](https://www.agora-energiawende.org/fileadmin/Projekte/2019/Jahresauswertung_EU_2019/A-EW_EU-Annual-Report-2019_Slide-Deck.pdf)
- [5] Nuclear Power in France. 2022. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>
- [6] Nuclear Power in Germany. 2022. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>
- [7] Ландау Ю.О., Бондаренко Ю.М., Цурик С.А. Значення ГАЕС в розвитку об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України. Промислова електроенергетика та електротехніка, №3 (123) 2020. – С.38-45. <http://promelektro.com.ua/archive.html>
- [8] Кот М.П. Елегазові вимикачі. *Гідроенергетика України*. 2020. №1-2. С.53-55. <https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2020-07/13.pdf>



# Математичне моделювання гідравлічних режимів водного потоку низьконапірних ГЕС з використанням рівнянь Сен-Венана

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.029>

Олександр Рябенко

Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
o.a.riabenco@nuwm.edu.ua

Павло Попруга

Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
p.v.popruha@nuwm.edu.ua

Поплавський Дмитро  
Науково-дослідний відділ  
ТОВ «ГІДРОТЕХПРОЕКТ»  
Харків, Україна  
dm.m.poplavskiy@gmail.com

**Анотація** – У роботі розглянуто використання диференціального рівняння Сен-Венана при розрахунку гідравлічних режимів водного потоку низьконапірних ГЕС. Наведено математичну модель, що базується на інтегруванні рівнянь Сен-Венана по явній кінцево-різницевої схемі з урахуванням умови стійкості по Куранту. Показано результати розрахунку гідравлічних режимів верхнього б'єфу Нижньодніпровської ГЕС.

**Ключові слова** – гідроелектростанція; рівняння Сен-Венана; гідравлічний режим; 2-D моделювання; пропускна спроможність.

## I. ВСТУП

Під час проектування та експлуатації гідровузлів (ГЕС, ГАЕС) необхідно проводити велику кількість заходів, що дозволять забезпечити нормальний рівень безпеки та надійності всіх гідротехнічних та гідроенергетичних споруд станції. До такого роду заходів можна віднести різного роду гідравлічні розрахунки, які, як правило, проводяться на етапі проектування. Неточності та помилки при проведенні таких розрахунків можуть привести до неоптимальних проектних рішень і як наслідок майбутніх руйнувань та аварій наведених споруд [1].

Найбільш складними, і при цьому найбільш важливими, гідравлічними розрахунками є встановлення гідравлічних режимів роботи верхнього та нижнього б'єфів гідровузла, особливо низьконапірних. Особливість низьконапірних ГЕС є відносно малий інтервал зміни вихідних основних гідравлічних параметрів (рівні в ВБ та НБ, витрати тощо), що унеможливило використання більшості класичних способів боротьби з негативними наслідками неоптимальних режимів роботи б'єфів. Провівши аналіз існуючих підходів до вказаних розрахунків [2-4] можна зробити висновок, що вони мають відносно вузьку сферу застосування, оскільки базуються на конкретних вихідних даних,

компоновки гідровузла, наближеннях тощо. Отримані результати згідно вказаних методів прийнятних результатів, як правило, виключно для певного або типового гідровузла.

Відповідно, в сучасній практиці проектування ГЕС та ГАЕС постає гостра необхідність в створенні універсальної математичної моделі розрахунку гідравлічних режимів роботи верхнього та нижнього б'єфів гідровузлів.

Мета роботи — висвітлення сучасного апробованого підходу до проведення розрахунків встановлення гідравлічних режимів в верхньому та нижньому б'єфах низьконапірних гідровузлів за рахунок проведення двохмірного (2-D) комп'ютерного моделювання.

## II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Для опису гідравлічного режиму водного потоку в верхньому або нижньому б'єфах гідровузлів доцільно використовувати систему диференціальних двовимірних рівнянь Сен-Венана з урахуванням не горизонтальності дна і донного тертя, що реалізована у вигляді:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial Q_1}{\partial x} - \frac{\partial Q_2}{\partial y}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_1^2}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_1 Q_2}{h} \right) - gh \frac{\partial(h+Z)}{\partial x} + T_1, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_1 Q_2}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_2^2}{h} \right) - gh \frac{\partial(h+Z)}{\partial x} + T_2, \quad (3)$$

де  $t$  – час;  $x, y$  – просторові координати;  $h$  – глибина води;  $Q_1, Q_2$  – витрати по осях  $x$  та  $y$ ;  $Z$  – відмітка дна;  $T_1, T_2$  – донне тертя по осях  $x$  та  $y$ .

Вперше у вітчизняній практиці проектування гідровузлів диференціальні рівняння Сен-Венана для проведення наведених розрахунків були використані головним спеціалістом науково-дослідного відділу ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ» Павловим Є.Ф. В подальшому запропонована ним математична модель постійно удосконалювалась та використовувалася під його керівництвом при проектуванні Дніпровського та Дністровського каскадів ГЕС та ГАЕС, ряд закордонних гідровузлів (Хідаська ГЕС, Ефіопія; Гродненська ГЕС, Білорусія; ГЕС Мткварі, Грузія; ГЕС Кан Дон та Нам Чіен, В'єтнам).

Як початкові умови системи рівнянь (1) – (3) задавалися значення рівня  $H_0(x, y)$  та вектори швидкості  $\vec{V}_0(x, y)$ ,  $\vec{V}_0 = (u, v)$  у початковий момент часу. На межі області, в якій проводиться чисельне рішення задачі, в процесі математичного моделювання, ставиться умова не протікання  $\vec{V} \times \vec{n} = 0$  ( $\vec{n}$  – одиничний вектор зовнішньої нормалі до границі), що відповідає жорсткій стінці, або умова втікання – витікання рідини. При втіканні рідини повинна спостерігатися умова –  $\vec{V} \times \vec{n} < 0$  з докритичною швидкістю  $|\vec{V} \times \vec{n}| < \hat{C}$  ( $\hat{C}$  – швидкість поширення хвилі збурення) на границі задається або вектором витрати  $\vec{Q}$  або глибиною  $h$  та проекцією  $\vec{Q} \times \vec{l}$  вектору  $\vec{Q}$  до одиничного вектору  $\vec{l}$ , що дотичний до границі. При втіканні з надкритичною швидкістю  $|\vec{V} \times \vec{n}| > \hat{C}$  на границі задається і вектор витрати  $\vec{Q}$  і глибина  $h$ . При витіканні  $\vec{V} \times \vec{n} > 0$  з докритичною швидкістю на границі задається або  $\vec{Q} \times \vec{n}$  – проекція витрати на нормаль або глибина  $h$ . При витіканні зі надкритичною швидкістю на границі ніяких умов не ставиться.

Інтегрування рівнянь (1) – (3) може проводитися з використанням програмних комплексів Mike, HEC-RAS тощо [5]. При цьому розрахунок проводиться за явною звичайно-різницевою схемою, внаслідок чого крок за часом у процесі рахунку визначається з умови стійкості Куранта. Необхідно додатково відмітити, що існує умова існування розрахунку системи рівнянь (1) – (3) математичного моделювання в плані (2-D) – коли співвідношення повздовжніх та поперечних розмірів б'єфу не перевищує відношення:

$$B/h > 5, \quad (4)$$

де  $B$  – ширина водойми по урізу води;  $h$  – глибина води. Якщо умова (4) порушується лише в кількох місцях, то застосування рівнянь (1) – (3) допустимо. При цьому картина течій буде правдоподібною лише на відстані  $(10 \div 15)h$  від місця, де порушена умова (4).

Наведена математична модель дозволяє проводити наступні розрахунки:

- рівневого та швидкісного режимів, а також профілів вільної поверхні водного потоку для течії, що встановилася (квазіустановилася);

- моделювання нестационарних течій
- моделювання проривної хвилі;
- моделювання динаміки спрацювання та заповнення, а також трансформації б'єфів;
- моделювання гідравлічних режимів у б'єфах, пов'язаних із добовим регулюванням, а також пуском та зупинкою гідроагрегатів станцій тощо.

Наведена математична модель була успішно використана для повторного гідравлічного розрахунку при зміні умов підходу потоку до водозливної греблі в верхньому б'єфі Нижньодністровської ГЕС [6] і впливу їх на пропускну здатність наведеної споруди. Розрахунок обумовлений наявністю у верхньому б'єфі Нижньодністровської ГЕС підводних штучних "островів", що утворилися в процесі будівництва гідровузла та раніше в проєкті не враховувалися при гідравлічному моделюванні.

Попередньо було проведено промірювання рельєфу дна акваторії верхнього б'єфу Нижньодністровської ГЕС [7], що слугували вихідними даними для гідравлічного розрахунку (зображено на рис. 1).



Рисунок 1. Результати промірювання рельєфу дна акваторії верхнього б'єфу Нижньодністровської ГЕС

Для виконання моделювання намічалася досліджувана ділянка акваторії верхнього б'єфа з ізобатами, виділяються розрахункові зони з морфометричними характеристиками. В подальшому була створена 2-D модель верхнього б'єфу – для чого досліджувана зона акваторії б'єфа розбивається в плані на прямокутну сітку з характерними стільниковими осередками по  $\Delta X$  і  $\Delta Y$ . Сітка забезпечує розрахункову схематизацію водойми для моделі з точністю до постійних кроків сітки. Для кожного стільникового осередку сітки в матрицю математичної моделі вводяться вихідні початкові значення рівнів води, глибин, векторів швидкостей



тощо. Розрахунок проводився для пропуску розрахункового паводку ( $Q_{0,1\%} = 8320 \text{ м}^3/\text{с}$  при  $РВБ = +77,800 \text{ м}$ ), а також для перевірного ( $Q_{0,01\%} = 13260 \text{ м}^3/\text{с}$  при  $РВБ = +82,000 \text{ м}$ ).

За результатами математичного моделювання було отримано:

- плани течії у векторному відображенні, у процесі наповнення б'єфа для характерного гідрографа пропуску розрахункового і перевірного паводків;
- хронограм зміни середніх по глибині (або середніх на вертикалях) у розрахункових стільникових осередках) швидкостей у залежності від рівнів води при наповненні водойми;
- планових епор максимальних, середніх по вертикалі, швидкостей потоку води в акваторії верхнього б'єфа на характерні проміжки часу;
- ізоліній максимальних, середніх по глибині, швидкостей у досліджуваній акваторії при наповненні б'єфа.

Результати досліджень частково представлені в таблиці 1, де проведено порівняння отриманих результатів з даними, що були отримані при проведенні гідравлічних розрахунків під час проєктування гідровузла (1981-1984 рр.), а також на рисунках 2-4.

ТАБЛИЦЯ 1. Порівняння результатів розрахунків

Параметр	Проектний варіант (без штучних «островів»)	Сучасний розрахунок (з уточненим рельєфом дна та штучними «островами»)
<b>Розрахунковий паводок (<math>Q_{0,1\%} = 8320 \text{ м}^3/\text{с}</math> при <math>РВБ = +77,800 \text{ м}</math>)</b>		
Площа живого перерізу в ВБ $\omega_1, \text{ м}^2$	8 570	8 191
Площа живого перерізу на вході перед бичками $\omega_2, \text{ м}^2$	2 507	
Швидкість потоку (середня по перерізу) в ВБ $V_1, \text{ м/с}$	0,97	1,02
Швидкість потоку (середня по перерізу) на вході перед бичками $V_2, \text{ м/с}$	3,32	3,32
Величина гідравлічних втрат напору $h_\xi = 0,4 \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}, \text{ м}$	<b>0,21</b>	<b>0,20</b>
<b>Перевірочний паводок (<math>Q_{0,01\%} = 13260 \text{ м}^3/\text{с}</math> при <math>РВБ = +82,000 \text{ м}</math>)</b>		
Площа живого перерізу в ВБ $\omega_1, \text{ м}^2$	11 762	11 428
Площа живого перерізу на вході перед бичками $\omega_2, \text{ м}^2$	3 162	
Швидкість потоку (середня по перерізу) в ВБ $V_1, \text{ м/с}$	1,13	1,16
Швидкість потоку (середня по перерізу) на вході перед бичками $V_2, \text{ м/с}$	4,19	4,19
Величина гідравлічних втрат напору $h_\xi = 0,4 \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}, \text{ м}$	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>

Аналіз отриманих результатів показав, що впливу підводних штучних «островів» на ступінь стиснення потоку (див. таблицю 1) є незначним (останні зменшують живий переріз на 4,4% при пропуску розрахункового паводку і на 2,8% при пропуску перевірного паводків). Слід зазначити, що вказані вище величини стиснення живого перерізу знаходяться в межах точності результатів експериментального фізичного моделювання, і тому, ймовірно, не дали б кількісних результатів на фізичній моделі. Тому чисельне математичне моделювання у даних конкретних умовах є кращим.

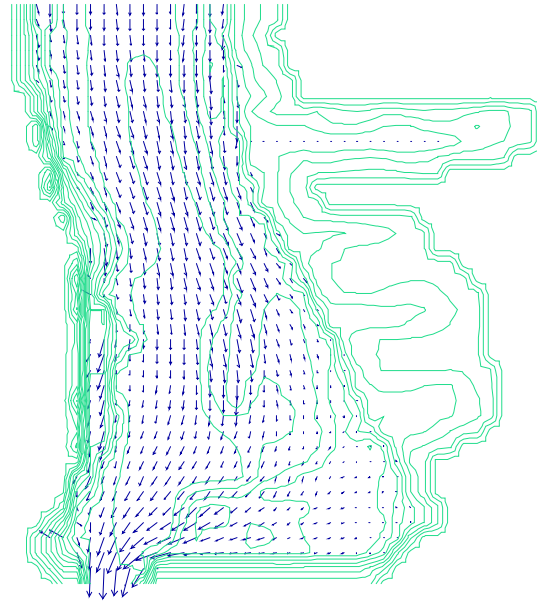


Рисунок 2. Розрахунковий план течії на поверхні русла акваторії ВБ з рельєфом поверхні Нижньодніпровської ГЕС при пропуску розрахункового паводку

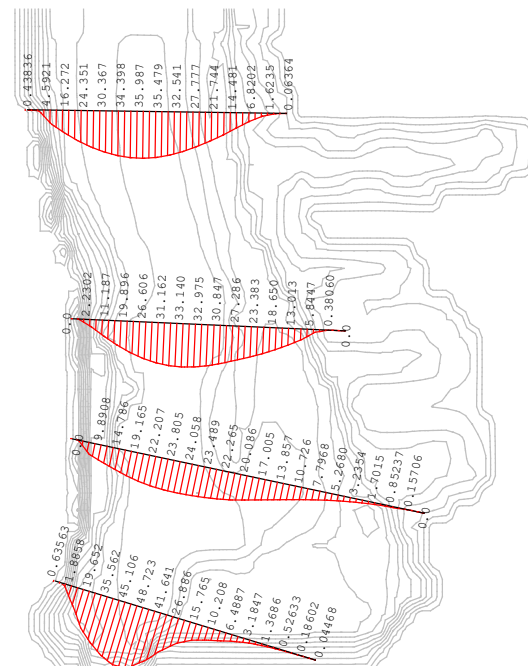


Рисунок 3. Розрахункові епори питомої витрати акваторії ВБ з рельєфом поверхні Нижньодніпровської ГЕС при пропуску перевірного паводку

Виконані та зведені до таблиці 1 розрахунки з оцінки величин втрат для двох варіантів (без «островів» та за їх наявності) показують, що вплив штучних «островів» на величину втрат на вході у водоскидні споруди практично відсутній. Як видно з результатів, пропуск розрахункового паводку за наявності штучних «островів» забезпечує навіть трохи меншу величину втрат, ніж за їх відсутності. Останнє пояснюється збільшенням значення та більш плавним входом.

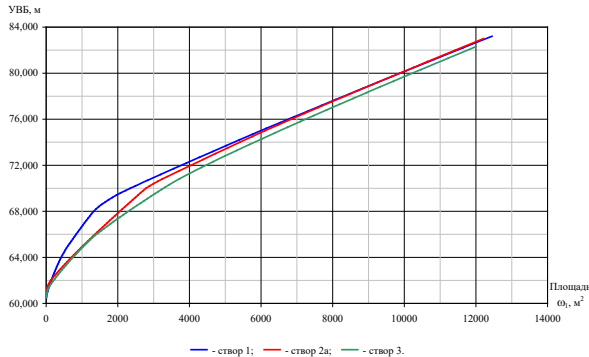


Рисунок 4. Графік зміни площ живих перерізів у створах 1, 2а та 3 ( $\omega_1 = f(\nabla \text{РВБ})$ )

Виходячи з аналізів результатів цих досліджень слід констатувати, що стиснення живого перерізу русла у верхньому б'єфі практично не тягне за собою погіршення гідравлічних умов входу, а отже, і не тягне за собою зменшення пропускної здатності гідровузла. З цієї причини зазначене стиснення за умов забезпечення проектної (нормативної) пропускної спроможності не вимагає розчищення русла у верхньому б'єфі.

### III. ВИСНОВКИ

Проведення математичного моделювання гідравлічних режимів верхнього та нижнього б'єфів гідровузлів на етапі проектування є необхідною

умовою для забезпечення їх надійності, ефективності та безпеки при подальшій експлуатації.

Використання диференціальних двовимірних рівнянь Сен-Венана дозволяє проводити розрахунки гідравлічних режимів верхнього та нижнього б'єфів гідровузлів, в тому числі низьконапірних.

Згідно проведених розрахунків гідравлічних режимів верхнього б'єфу Нижньодніпровської ГЕС за наявності в акваторії водосховища підводних штучних «островів», які не враховувалися на етапі проектування, було встановлено, що вплив підводних штучних «островів» на величину втрат практично відсутній, а отже, і не тягне за собою зменшення проектної (нормативної) пропускної здатності гідровузла, хоча при цьому необхідно відмітити зміни ряду характерних параметрів (швидкостей, втрат напору тощо).

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Рябенко О. А. Гідроелектростанції в особливих природно-кліматичних умовах : підручник / О. А. Рябенко. - Рівне: НУВГП, 2024, 192 с.
- [2] Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие - М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [3] Слиский С.М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М.: Энергия, 1979, 334 с.
- [4] R.J. Houghtalen, A.O. Akan, N.H.C. Hwang, Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems. Fourth Edition. London: Pearson Education Ltd., 2010, 472 ps.
- [5] Гродненская ГЭС на реке Неман. Рабочая документация. Здание ГЭС. Гидравлические расчеты и исследования водоприемника, подводящего и отводящего каналов (арх. №1458-34-T07). г. Харьков: ОАО «Укргідпроект», 2008, 104 с.
- [6] Нижньодніпровська ГЕС. URL: <http://dn-gaes.com> (дата звернення 15.10.2024).
- [7] Технічний звіт по інженерно-геодезичним вишукуванням в верхньому б'єфі ГЕС-2. Київ: НВ ПП «Гідросервіс», 2005, 24 с.

# Автоматизована система контролю безпеки гідротехнічних споруд Київської ГАЕС

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.030>

Сергій Сунічук  
Національний університет водного господарства  
та природокористування  
Рівне, Україна  
[s.v.sunichuk@nuwm.edu.ua](mailto:s.v.sunichuk@nuwm.edu.ua)

Тарас Осницький  
Національний університет водного господарства  
та природокористування  
Рівне, Україна  
[t.o.osnitskyj@nuwm.edu.ua](mailto:t.o.osnitskyj@nuwm.edu.ua)

Микола Курган  
ТОВ "Спеціальний технологічний моніторинг"  
Київ, Україна  
[public@spectm.com.ua](mailto:public@spectm.com.ua)

**Анотація** – У статті розглянуто відомості про конструктивні особливості споруд Київської гідроакмулюючої електростанції, проектування і впровадження АСКБ ГТС, питання забезпечення надійності та безпеки, склад та основні технічні показники автоматизованої системи моніторингу за гідротехнічними спорудами.

**Ключові слова** – гідроенергетика, гідроакмулююча електростанція, гідротехнічна споруда, автоматизована система контролю, контроль-вимірювальна апаратура

## I. ВСТУП

Гідротехнічні споруди — це складні інженерні системи, які виконують широкий спектр функцій, від виробництва електроенергії до регулювання рівня води.

Київська ГАЕС розташована на правому березі Київського водосховища за три кілометри від створу основних споруд Київської ГЕС. Будівництво Київської ГАЕС розпочалась у 1962 році з перекриття частини русла Дніпра. Основні роботи, включаючи зведення будівлі гідроелектростанції, напірних трубопроводів, верхнього водосховища та відкритого розподільчого пристрою, тривали до 1976 року. Перший гідроагрегат був введений в експлуатацію 1970 році, а останній – у 1975 році.

Головне завдання ГАЕС – забезпечити стабільну роботу енергосистеми. Вночі, коли споживання електроенергії зменшується, вода за допомогою насосів перекачується у верхнє водосховище. У години пікового навантаження, як правило, у вечірній час, ця вода скидається через турбіни, виробляючи додаткову електроенергію.

До складу основних споруд ГАЕС входять: верхня водойма корисної ємності 3,6 млн.м<sup>3</sup>; підвідний канал; спрягаючі стояни; верховий водоприймач; напірні залізобетонні та металеві трубопроводи діаметром 3,8 м (6 ниток); будівля гідроакмулюючої електростанції з монтажним майданчиком; дренажна система берегового схилу; нижня водойма (Київське водосховище).

Верхова водойма витягнутої форми розміщена на виступі плато, що підіймається на 70 м над рівнем водосховища Київської ГЕС. Довжина водойми 1450 м, ширина 450 м. Водойма виконана в напіввиїмці-напівнасіпу. Підвідний канал має довжину близько 700 м і ширину по верху 110 м. Утворений канал земляними дамбами і залізобетонними підірними стінками. Водоприймач розміром в плані 12,6 x 52,5 м має шість водозабірних отворів 7 x 7 м. До водоприймача примикають залізобетонні стояни. Горизонтальні залізобетонні трубопроводи виконані у вигляді залізобетонної конструкції довжиною 130 метрів, що включає шість поздовжніх каналів прямокутного перерізу розміром 5,0 x 3,8 м. Похилі металеві напірні трубопроводи діаметром 3,8 м складаються з шести ниток, які укладені по спланованому і укріпленому від розмиву береговому схилу ухилом 1:5. Береговий схил на ділянці напірних трубопроводів укріплений, зсувні ґрунти в основі схилу видалені і відсипана упорна призма з відміткою гребеня +110,000 м, виконана з руслового піску. Будівля ГАЕС розміром в плані 34,4 x 79,3 м зведена на насипній піщаній подушці товщиною 3,2 x 4,3 м, що лежить на мергелях. Підшва будівлі розташована на відмітці +86,00м, відмітка верху – +110,60. З відмітки +100,00 будівля розділена на три секції температурними швами. Будівля ГАЕС обладнана шістьма агрегатами, з яких три машини оборотні і три машини – прямі турбіни.

Існуюча система забезпечення безпеки Київської ГАЕС ґрунтується на періодичних оглядах гідротехнічних споруд та ручній обробці інформації, отриманої від контроль-вимірювальних приладів. Комплексний контроль гідротехнічних споруд включає в себе як регулярні огляди, так і спеціальні дослідження проблемних зон з використанням сучасних методів.

Мета роботи – створення автоматизованої системи контролю безпеки гідротехнічних споруд, що забезпечить надійність та ефективність моніторингу за гідротехнічними спорудами Київської ГАЕС.

## II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Автоматизована система контролю безпеки призначена для безперервного моніторингу технічного стану гідротехнічних споруд шляхом вимірювання необхідних параметрів, їх обробки та подальшого аналізу. АСКБ – це інструмент для моніторингу стану гідротехнічних споруд. Вона збирає дані з датчиків, проводить їх попередню обробку, передає на наступний рівень для більш детального аналізу, зберігає результати та відображає їх у зручному для користувача форматі.

Інструментально контролюються такі показники стану і роботи споруд:

1. Рівні води у б'єфах і температура води – засобами АСК ГТС.

2. Просторові переміщення контрольних точок споруд – засобами стаціонарної системи моніторингу просторових переміщень споруд, що використовує технології космічної геодезії та далекомірні.

3. Осадки секцій бетонних споруд. Їх контролюють по висотних марках, розташованих по краях секцій, методом геометричного нівелювання з прокладкою ходів від опорних (вихідних) реперів.

4. Осадки гребеня огорожувальної дамби верхньої водойми і б'єрм берегового схилу в окремих контрольних точках – по поверхневих ґрунтових марках.

5. Горизонтальні переміщення опор металевих трубопроводів по схилу – по відповідних контрольних знаках. Контролюються шляхом далекомірних вимірювань.

6. Горизонтальні деформації берегового масиву – по зворотних висках, що розташовані по три з кожного боку створу споруд. Вимірюються датчиками АСК, також продовжують ручні вимірювання, як контрольні.

7. Відносні переміщення суміжних секцій бетонних споруд, які характеризують роботу деформаційних швів. Продовжуються ручні вимірювання по існуючих щілиномірах із застосуванням переносного штангенщілиноміра.

8. Вертикальні деформації підсхильного ґрунтового масиву – із допомогою екстензометричних колон із дистанційними екстензометричними датчиками.

9. Горизонтальні деформації підсхильного ґрунтового масиву – із допомогою інклінометричних гірлянд із дистанційними інклінометричними датчиками.

10. Нахили опор металевих трубопроводів – із допомогою точкових інклінометричних датчиків.

11. Рівні (напори) фільтраційного потоку в основі водоприймача – із допомогою закладних безнапірних п'єзометрів та занурених п'єзодинамометрів.

12. Рівні поверхні фільтраційного потоку в тілі і основі ґрунтової дамби і в ґрунтових масивах навколо водойми і під береговим схилом – за допомогою опускних п'єзометрів та занурених п'єзодинамометрів.

13. Витрати фільтраційної води з дренажів – за допомогою мірних водозливів та датчиків.

АСКБ ГТС має трирівневу архітектуру: нижній, середній і верхній рівень. Нижній рівень АСКБ забезпечує отримання інформації про стан споруд у вигляді сигналів від датчиків. Середній рівень забезпечує збір даних від технічних засобів нижнього рівня, первісну обробку цих даних, збереження їх в оперативній пам'яті і передачу їх на верхній рівень. Верхній рівень призначений для збору інформації від технічних засобів середнього рівня, остаточної її обробки та збереження в базі даних. Первинні дистанційні датчики здебільшого встановлюються в контрольних точках поодиночці і функціонують самостійно (рис. 1). Основним елементом дистанційного датчика є вимірювальний перетворювач. Локальні системи збору даних забезпечують збереження показників контрольно-вимірювальних приладів в пам'яті реєстратора даних з подальшою їх передачею на центральний вузол обробки даних – сервер збору даних. Локальні концентратори даних забезпечують збереження показників контрольно-вимірювальних приладів в пам'яті реєстратора даних з подальшою їх передачею на центральний вузол обробки даних. Мультиплектори вимірювальних каналів застосовуються для зменшення кількості локальних концентраторів даних 4-х (8-ми) каналний мультиплектор, призначений для комутації одно або двопарних аналогових виходів датчиків на один вимірювальний вхід локального концентратора даних. Локальний комутатор даних представляє собою автоматичний вимірювальний комплекс для вимірювань показників датчиків в автоматичному режимі та надає можливість проведення ручних вимірювань підключених до нього датчиків.

Великі земляні та бетонні споруди є основними спорудами в процесі виробітку електричної енергії. До чинників, які викликають додаткове напруження, відносяться коливання рівнів води, переміщення сусідніх секцій споруди та сейсмічна активність. Дане додаткове напруження необхідно контролювати, оскільки раннє виявлення проблеми дозволить попередити аварію або мінімізувати її вплив. Даний контроль частково покладається на геодезичний моніторинг стану споруд. Система постійного моніторингу зміщень споруди є підсистемою АСКБ ГТС Київської ГАЕС.



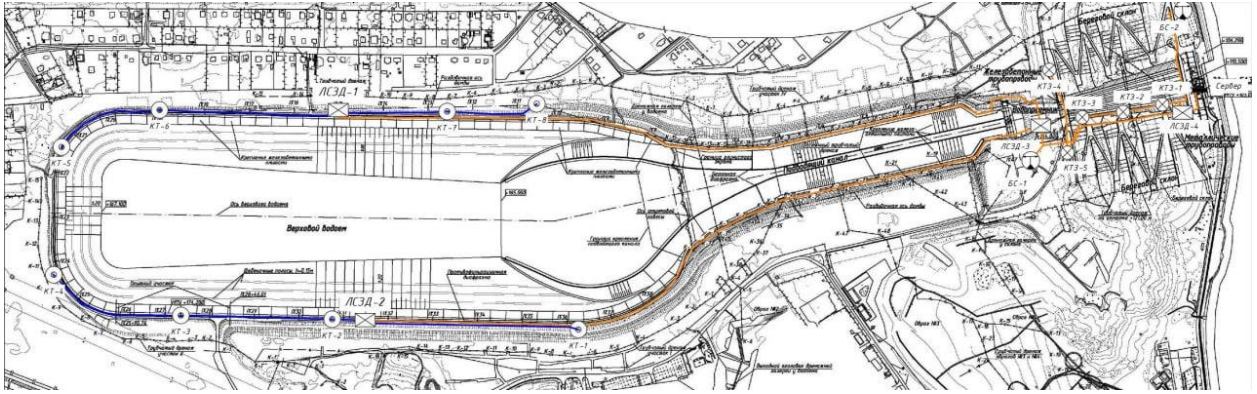


Рисунок 1. План розміщення контрольних точок АСКБ ГТС Київської ГАЕС



Рисунок 2. Спостереження за гідротехнічними спорудами Київської ГАЕС (2023 р.)

ЛІТЕРАТУРА

Базові (референтні) станції, що діють як опорні та стабільні станції для об'єкту моніторингу. Вони призначені для постійних спостережень GNSS та репрезентації робочих систем координат для всього об'єкту постійного моніторингу. Розташовуватимуться на стабільних ґрунтах (блоках земної поверхні) за межами об'єкту моніторингу.

ІІІ. ВИСНОВКИ

Пропонована автоматизована система контролю безпеки гідротехнічних споруд, розроблена для Київської гідроакumuлюючої електростанції, включає в себе систему контролю за спорудами і систему безперервного моніторингу зміщення споруд. Автоматизована система контролю значно підвищить рівень безпеки гідротехнічних споруд Київської ГАЕС завдяки постійному моніторингу їхнього стану та своєчасному виявленню будь-яких відхилень від нормального режиму роботи.

[1] ДБН В.2.443:2010 "Гідротехнічні споруди. Основні положення".  
 [2] ДБН В 1.2414:2008. "Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ".  
 [3] ДСТУ Б В.2.642542003. Автоматизовані системи технічного діагностування будівельних конструкцій. Загальні технічні вимоги.  
 [4] ДСТУ-Н Б В.2.5437:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Наставова з проектування, монтажування та експлуатації автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями і спорудами.  
 [5] ГКД 34.20.50742003. Технічна експлуатація електростанцій України. Правила. Підрозділ 7.1. Гідротехнічні споруди і їх механічне обладнання.  
 [6] Автоматизована система контролю гідротехнічних споруд (АСК ГТС) Дніпровської ГЕС – від задуму до втілення / В.А. Шульга, В.С. Чугунніков, В.Л. Рассовський, Ю.А. Бісовецький, Е.С. Щучик, С.А. Кухтаров, Б.А. Рудик, А.Н. Пудлик // Гідроенергетика України. – 2017. – № 3-4. – С. 59-65.  
 [7] Надійність та безпека гідротехнічних споруд в умовах тривалої експлуатації / Г. Г. Фаренюк [та ін.] // Наука та будівництво : наук.-техн., виробн. та інформ.-аналіт. журнал. – 2019. – № 2. – С. 4-18.



# Моделювання режимів роботи вакуумних систем автоматизованих насосних станцій

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.031>

Юрій Філіпович

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
y.y.filipovych@nuwm.edu.ua

Назарій Стельмах

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
n.o.stelmakh@nuwm.edu.ua

**Анотація** – Змодельовано вплив параметрів вакуумних установок на характер технологічного процесу вакуумної системи. Розроблено принципи подібності для перерахунку характеристик робочого циклу вакуумних установок.

**Ключові слова** – вакуумна установка; залив насоса; робочий цикл вакуумної системи; живильна труба вакуумного котла; принцип подібності.

**Ефективна експлуатація** автоматизованих насосних станцій (АНС) в значній мірі залежить від підтримання їх основного та допоміжного обладнання у справному стані, роботи відцентрових насосів при високих к.к.д., дотримання контролю за витратою насосів, впровадження засобів автоматизації і телемеханіки. Надійним видом заповнення водою та подальшого підтримання у залитому стані відцентрових насосів є використання вакуумних систем.

Сучасна автоматизована насосна станція є великим гідроенергетичним вузлом. Він складається із гідротехнічних, енергетичних і будівельних споруд, енергетичного і гідромеханічного обладнання. Кожен елемент системи забезпечує безвідмовну роботу обладнання, тому від роботи вакуум-системи залежить робота всієї насосної станції [1]. Вакуумні системи відносяться до допоміжного обладнання АНС, але забезпечують надійну роботу відцентрових насосів, отже дослідження їх технологічних процесів є актуальним питанням.

**Наукове завдання** полягає у дослідженні технологічних процесів систем заповнення водою відцентрових насосів, удосконаленні методики розрахунку робочих циклів вакуумних установок та їх елементів.

**Об'єктом досліджень** є робочий цикл вакуумної системи, а предметом досліджень – конструкції вакуумних систем, тривалість робочого циклу та вплив параметрів вакуумної установки на її експлуатаційні характеристики.

**Метою досліджень** є удосконалення існуючих та розробка нових аналітичних та чисельних методів розрахунку робочих циклів вакуумних систем АНС.

**Розроблено методику** проведення досліджень для зняття робочих характеристик вакуум-насоса та ежектора і параметрів робочого циклу вакуумної

системи та методику досліджень для визначення впливу заповнення водою вакуум-насоса на його робочу характеристику, а також для визначення витрати повітря, яке підсмоктується до вакуумної системи.

Залежність для перерахунку об'ємної витрати повітря ( $Q$ ), підсмоктаного у вакуумний котел, у координати масової витрати ( $G$ ), описується лінійною залежністю

$$G = \alpha - \beta \cdot h_{\text{вак}}, \quad (1)$$

де  $h_{\text{вак}}$  – вакуум у вакуумній системі, м;  $\alpha, \beta$  – емпіричні коефіцієнти.

Під час чисельних та аналітичних розрахунків користуватися характеристиками у координатах масової витрати ( $G-h_{\text{вак}}$ ) зручніше, ніж характеристикою приведеної об'ємної витрати ( $\bar{Q}-h_{\text{вак}}$ ), тому що поняття масова витрата є більш чітким і визначеним, ніж поняття приведена об'ємна витрата повітря [2].

Основною характеристикою роботи вакуумної системи є її **робочий цикл** – так називається технологічний процес, під час якого робочі та резервні відцентрові насоси з допомогою вакуум-систем перебувають у готовності до пуску, тобто у заповненому водою стані.

Збільшення тривалості робочого циклу вакуум-системи у більшості випадків пов'язане із додатковими витратами енергії або фінансів. Наприклад, збільшення висоти і площі вакуумного котла і площі живильної труби вимагає додаткових капіталовкладень [3, 7]. Але збільшення часу робочого циклу зменшує зношення насосного обладнання і витрати енергії при експлуатації.

Із зростанням початкової відмітки води  $Z_A$  від 3,0 до 3,6 м, тобто із зменшенням прошарку повітря у вакуумному котлі ( $Z_K=4,56$  м=const), тривалість робочого циклу скорочується від 1020 до 780 с. Отже доцільно призначати позначку початкової відмітки по-можливості більш низькою, але не нижчою відмітки верху корпусів насосів, розміщених під заливом. Збільшення діаметра живильної труби  $d$  від 50 до 200 мм призводить до помітного збільшення часу циклу  $t_{\text{ц}}$  від 855 до 1245 с [6].

Збільшення площі поперечного перерізу  $S_K$  вакуумного котла від 0,3 до 0,9 м<sup>2</sup> викликає зростання  $t_{\text{ц}}$  від 676 до 993 с. Із зростанням об'єму котла час робочого циклу збільшується, що пояснюється більшим об'ємом прошарку повітря у вакуум-котлі. Але, оскільки ціна матеріалу, з якого виготовляється котел при цьому теж збільшується, то питання про розміри вакуум-котла потрібно вирішувати в результаті техніко-економічного порівняння варіантів.

При зростанні часу роботи вакуум-насоса у робочому циклі  $t_1$  від 15 до 60 с, відзначалося збільшення часу робочого циклу  $t_{\text{ц}}$  від 615 до 1330 с [6]. За більший час закачування рівень води у вакуумному котлі підніметься на вищу позначку, а зменшення відмітки води при подібних умовах експлуатації установки буде практично однаковою.

Збільшення коефіцієнта витрати живлячої труби  $\mu$  від 0,2 до 0,7 викликає збільшення робочого циклу  $t_{\text{ц}}$  від 807 до 964 с. При усіх інших рівних умовах  $\mu$  збільшується разом із збільшенням діаметра і зменшенням довжини труби, то її доцільно проектувати якомога більших поперечних перерізів і більш короткою.

Виконано перевірку методики розрахунку часу заповнення водою відцентрового насоса, яку проведено на діючій насосній станції меліоративно-екологічного комплексу базового господарства науково-навчально-виробничого центру КСП "Світанок" в с. Бечаль Костопільського району Рівненської області.

Виконане енерго-економічне порівняння роботи вакуум-систем АНС, оснащених вакуумним насосом і ежектором. Проведено ряд досліджень робочих циклів вакуум-системи, оснащеної різними вакуумними насосами (РМК-2\* та RV-550-01-EE) і ежектором із трьома змінними соплами (діаметрами 25, 30 і 35 мм). Крім того, було проведено ряд розрахунків на ЕОМ робочих циклів вакуумних систем, що оснащені іншими вакуумними насосами типу КВН, ВВН і РМК. Розрахунки свідчать, що при усіх однакових геометричних параметрах вакуум-системи та однаковому часі роботи вакуумного насоса або ежектора, кращі енерго-економічні показники мають вакуумні насоси.

Таблиця 1

**Енерго-економічні характеристики вакуумної системи у залежності від марки вакуум-насоса або діаметра сопла ежектора**

Марка вакуум-насоса	Час робочого циклу, $t_{\text{ц}}$ , с	К-ть увімкнень обладнання за рік, $n$	Час роботи ел. двигуна, $t_{\text{дв}}$ , год	Витрачена енергія, $E$ , кВт.год	Вартість ел.енергії, $S$ , грн/рік
<b>вакуум-насоси</b>					
КВН-8	562	56153	476,94	1335,4	173,60
ВВН-1,5	968	32601	271,68	1086,7	141,27
ВВН-12	1240	25450	212,08	4241,6	551,41
РМК-2*	840	37569	313,08	3130,8	407,00
РМК-4	1223	25803	215,03	15052,1	1956,77
RV-550-01-EE	753	41910	349,25	2619,4	340,52
<b>ежектор</b>					
сопло $\varnothing$ 25мм	272	115942	966,18	16908,15	2198,06
сопло $\varnothing$ 30мм	416	75808	631,73	11055,28	1437,19
сопло $\varnothing$ 35мм	373	84547	704,56	12329,8	1602,87

Пуск ежектора потребує також увімкнення відцентрового насоса, для подачі рідини у камеру змішування ежектора. Цей насос, у свою чергу, також потребує заповнення водою. Для цього необхідно встановити один вакуумний насос. Тому,

при створенні систем заповнення водою відцентрових насосів рекомендується використовувати вакуум-насос.

Удосконалено метод визначення характеристик підсмоктаного повітря. Він полягає у тому, що замість розв'язання системи із 3÷5 рівнянь, потрібно визначити середні значення масової витрати повітря

$$G'_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n G'_i}{n}, \text{ і коефіцієнта } E_{\text{сеп}}: E_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}.$$

Потім задаємося будь-яким параметром витрати повітря через нещільності вакуумної системи, що омиваються водою ( $\Delta G$ ) або через нещільності, що перебувають в повітрі ( $S_H$ ) – і визначаємо інший

$$S_H = \frac{G'_{\text{сеп}} - \Delta G}{E_{\text{сеп}}}. \quad (2)$$

Перевірка цієї методики показує, що похибка буде у межах точності розрахунку (близько 2%), якщо прийняти  $\Delta G + S_H \cdot E = \text{const} = G'_{\text{сеп}}$ .

Використані **принципи подібності** для перерахунку параметрів робочого циклу вакуум-системи із дотриманням виконання умов подібності натурних і модельних параметрів системи [5]. Розроблено методику визначення приведеної площі живлячої труби  $\mu \cdot S_T$ . Після розрахунків було отримано середні її значення. Для кожної серії дослідів будуємо криву (рис.1). Використовуючи її можна побудувати графіки робочого циклу для будь-якої вакуум-системи, оснащеної живлячою трубою з показником  $\mu \cdot S_T$  меншим, або рівним, ніж максимальне значення на рис.1, тобто менше, ніж  $\bar{\mu} \cdot \bar{S}_T = 0,0116 \text{ м}^2$ .

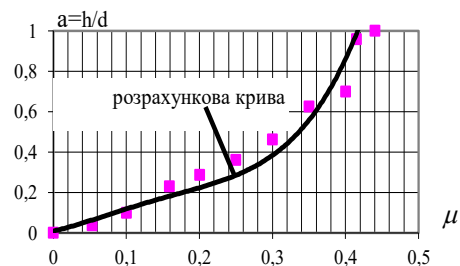


Рис. 1. Крива  $\mu=f(h/d)$

Крива  $\mu=f(h/d)$  показує, що при зменшенні величини відкриття засувки, коефіцієнт витрати  $\mu$  спочатку зменшується дуже повільно, а потім зменшення безперервно зростає і при відкритті  $h/d=0$  коефіцієнт витрати також виявляється рівним нулю [4].

Виконана перевірка на вакуум-установці, оснащений живильними трубами з різними діаметрами (200 мм, 81,5 мм і 50 мм) свідчить, що координати характерних точок графіків робочих циклів вакуум-систем, які ми порівнюємо, практично співпали.

Для визначення характеристики приведеної площі живлячої труби вакуумного котла маємо залежність

$$\mu \cdot S_T = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{d^{4/3}}{124,5 \cdot l \cdot n^2 + d^{4/3} \cdot \sum \zeta_i}}, \quad (3)$$

де  $l$  - довжина труби, м;  $n$  - коефіцієнт шорсткості стінок труби;  $\sum \zeta_i$  - сума коефіцієнтів місцевих опорів;  $d$  - діаметр труби, м.

Із наведеної формули видно, що при зростанні діаметра труби  $d$  параметр  $\mu \cdot S_T$  зростає, а зростання довжини труби  $l$ , коефіцієнта шорсткості стінок труби  $n$  та суми коефіцієнтів місцевих опорів  $\sum \zeta_i$  викликає зменшення. При виведенні формули не застосовувалися ніякі обмеження. Отже вона дійсна для будь-яких величин  $d$ ,  $l$ ,  $n$  та  $\sum \zeta_i$  живильних труб вакуум-котлів. Встановлено вплив параметра  $\mu \cdot S_T$  на тривалість робочого циклу  $t_{\text{ц}}$ , тривалість третього періоду спадання відмітки води у вакуумному котлі  $t_3$ , вакууму  $h_{\text{вак},B'}$  та на рівні води у вакуум-котлі  $Z_B$  та  $Z_C$  [7, 8].

На рис. 2 наведено графіки залежності чотирьох названих вище елементів робочого циклу від параметра  $\mu \cdot S_T$ .

Графіки говорять про те, що зі зростанням  $\mu \cdot S_T$  вакуум  $h_{\text{вак},B'}$  знижується, а рівень  $Z_B$ , навпаки, зростає. Різниця  $(h_{\text{вак},B'} - Z_B)$  прямує до нуля. Взаємне наближення  $h_{\text{вак},B'}$  та  $Z_B$  призводить до скорочення часу другого періоду ( $t_2$ ) у робочому циклі.

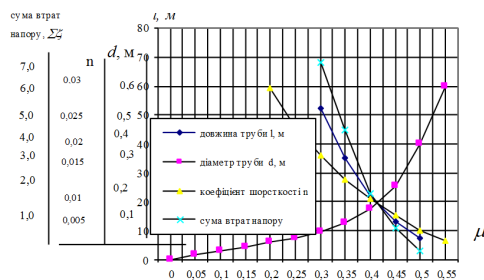


Рис.2. Графіки залежності  $l$ ,  $n$ ,  $d$  та  $\sum \zeta_i$  від коефіцієнта витрати  $\mu$

Проводячи вертикальні перерізи графіків на рис.2 можемо отримати параметри для побудови графіків робочого циклу вакуум-системи.

Отримані графіки залежності величин  $l$ ,  $d$ ,  $n$  та  $\sum \zeta_i$  від коефіцієнта витрати живлячої труби  $\mu$  говорять про те, що із збільшенням  $l$ ,  $n$  та  $\sum \zeta_i$  коефіцієнт витрати живлячої труби зменшується. З рис.2 випливає, що із зменшенням  $\mu$  тривалість робочого циклу вакуум-системи при постійному часу роботи вакуум-насоса також зменшується. Це призводить до збільшення енергоємності робочого процесу вакуумної установки. Отже, для економії при експлуатації вакуумної установки довжину живлячої труби, коефіцієнт шорсткості і коефіцієнт місцевих опорів слід якомога зменшувати.

### Висновки

1. Розрахунковим і експериментальним шляхом отримано графічну залежність часу

робочого циклу вакуум-системи від початкової позначки води у вакуум-котлі, висоти та площі поперечного перерізу вакуум-котла, часу роботи вакуум-насоса, площі живлячої труби вакуум-котла та коефіцієнта витрати живлячої труби.

2. Запропоновано нові залежності для експериментального визначення витрати повітря, підсмоктаного у вакуум-систему. Отримана аналітична залежність для визначення приведеної площі живлячої труби та графічна залежність вакууму і рівнів води у вакуум-котлі та часу усіх періодів робочого циклу від значень приведеної площі живлячої труби.

3. Отримано залежність коефіцієнта витрати та приведеної площі живлячої труби від довжини, діаметра і коефіцієнта шорсткості стінок труби, а також суми втрат напору у ній.

4. Результати роботи дозволяють при реконструкції, проектуванні та експлуатації насосних станцій визначати параметри основних елементів вакуумних систем з метою забезпечення більшої часу робочого циклу та економії електроенергії під час їх роботи.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Філіпович Ю. Ю. Вплив заповнення водою вакуум-насоса на характер його роботи // Гідромеліорація і гідротехнічне будівництво.- Вип. 23.- Рівне, 1998.- С. 87-92.
- [2] Філіпович Ю. Ю. Розрахунок на ЕОМ робочого циклу вакуумної системи з ежекторною установкою // Гідромеліорація і гідротехнічне будівництво.- Вип. 23.- Рівне, 1998.- С. 83-87.
- [3] Філіпович Ю. Ю. Вплив розмірів елементів вакуумної системи автоматизованої насосної станції на тривалість її робочого циклу // Водне господарство України.- 1999.- № 5-6.- С. 39-41.
- [4] Філіпович Ю. Ю. Моделювання робочого циклу вакуумної установки // Вісник РДТУ.- Вип. 2.- Ч. 1. - Рівне, 1999.- С. 237-240.
- [5] Назаров М. Т., Філіпович Ю. Ю. Робочий процес вакуумної установки автоматизованої насосної станції і зв'язок його з параметрами живлячої труби // Вісник РДТУ. Гідромеліорація і гідротехнічне будівництво.- Зб. наук. праць. Спецвипуск.- Рівне, 1999.- С. 145-151.
- [6] Назаров М. Т., Філіпович Ю. Ю. Вплив параметрів живлячої труби вакуумної установки на її енерго-економічні показники // Водне господарство України.- 2000.- № 3-4.- С. 53-54.
- [7] Філіпович Ю.Ю. Надійність роботи вакуумних систем автоматизованих насосних станцій // Збірник тез III Міжнародної науково-практичної конференції «Євразійські наукові дискусії», 10-12 квітня 2022 р., Барселона, Іспанія. – The 3rd International scientific and practical conference “Eurasian scientific discussions” (April 10-12, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2022. – р. 87-92. Код доступу: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/04/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-10-12.04.22.pdf>.
- [8] Філіпович Ю.Ю. Обґрунтування параметрів надійної роботи допоміжного обладнання автоматизованих насосних станцій // Збірник тез XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Multidisciplinary academic research, innovation and results», 05-08 квітня 2022 р., Прага, Чехія. – Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference. Prague, Czech Republic, April 05 – 08, 2022. – р. 783-788. Код доступу: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/04/Multidisciplinary-academic-research-innovation-and-results.pdf>



***СЕКЦІЯ 3  
ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ***

# *Development of a software architecture concept for solving singularly perturbed problems in semiconductor electronics*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.032>

Andrii Bomba  
National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
a.ya.bomba@nuwm.edu.ua

Igor Moroz  
Rivne State University of Humanities  
Rivne, Ukraine  
igor\_moroz@yahoo.com

Zakhar Listiev  
National University of Water and Environmental Engineering  
Rivne, Ukraine  
z.c.listiev@nuwm.edu.ua

**Abstract** – The software architecture for automated solving of singularly perturbed problems in semiconductor electronics is presented. The system is based on the boundary correction method and domain-driven design (DDD). The developed software architecture integrates an artificial neural network for analyzing types of mathematical subproblems and selecting the most suitable method for solving them. The use of modern information technologies such as parallelization, cloud computing, and symbolic computations enables a new level of automated modeling. The research results demonstrated the effectiveness of the proposed approach in solving complex mathematical problems with singular perturbations.

**Keywords** – Singularly perturbed problems, domain-driven design; artificial neural network; automated modeling; boundary correction method; symbolic computations.

## I. INTRODUCTION

Singularly perturbed problems are common in the theory of differential equations, especially in physics and electronics, where they are used to model processes in complex technical systems such as plasma diodes. These problems include small parameters that significantly affect the behavior of solutions, particularly their asymptotic properties [1,2]. Solving such problems using classical numerical methods is inefficient due to sharp transitions in the solution, requiring extensive computational resources. The boundary correction method, one of the asymptotic methods, allows approximate solutions by expansions in small parameters. With advancements in computing resources and the emergence of new information technologies, such as artificial intelligence and cloud computing, etc. [3-6], solving singularly perturbed problems can be simplified and optimized.

## II. SOFTWARE ARCHITECTURE

The developed architecture is based on domain-driven design (DDD) principles [4,5], ensuring efficient organization of the software system for solving singularly perturbed problems. The system decomposes the primary problem into subproblems using the boundary correction method. Each subproblem is analyzed by an artificial neural network, which determines the optimal method—analytical or numerical—for solving it. The software architecture consists of several interconnected blocks. The symbolic transformation block ensures the formal transformations of the initial problem and builds recurrent subproblem sequences. The numerical solution block applies modern computational methods to find exact or approximate solutions for each subproblem. The intelligent analysis block is responsible for identifying the type of mathematical problem and selecting the appropriate solution method using artificial neural networks. Finally, the result aggregation block consolidates the subproblem results into a single solution for the main problem.

The implementation of the software system uses modern tools such as the .NET framework for parallelized computations [3] and the Math.NET library for symbolic and numerical computations. An important component is the use of Microsoft Azure cloud technologies to scale computational resources. The architecture is modular, allowing new methods to be easily added or adapted for solving other problems. Interaction between different modules, such as symbolic transformations and numerical solutions, is achieved through clearly defined interfaces, making the system flexible and extendable.



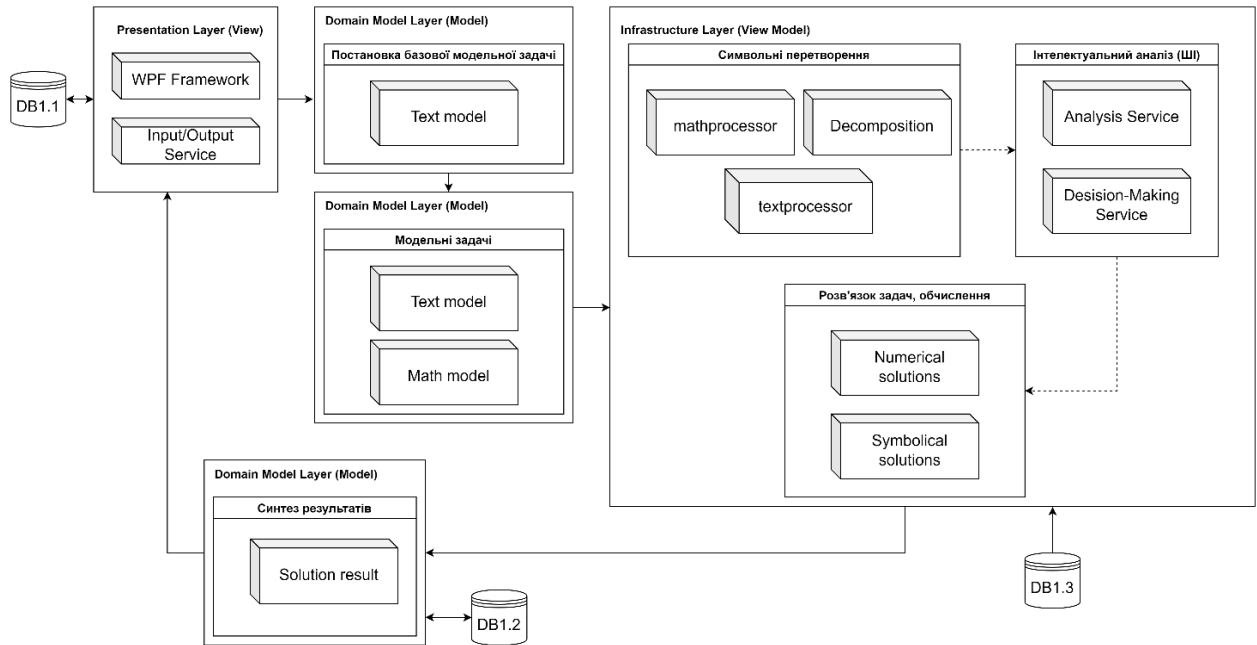


Fig. 1. Modeling and analysis software architecture using WPF, domain models, and infrastructure services

CONCLUSION

The proposed software architecture demonstrates significant effectiveness in solving singularly perturbed problems using the boundary correction method and modern information technologies. The inclusion of artificial neural networks for the automatic selection of solving methods greatly enhances the system's capability by improving both the accuracy and speed of computations. This approach minimizes manual intervention, allowing the system to adapt dynamically to various problem types by choosing the most appropriate computational technique, whether analytical or numerical. Such automation not only reduces computational overhead but also increases the overall efficiency of the process, making it particularly valuable for complex and resource-intensive problems.

The modular nature of the architecture is another key advantage, allowing for continuous improvement and adaptation. New methods and technologies can be integrated into the system as they emerge, ensuring that the architecture remains relevant and capable of tackling future challenges in computational modeling. This modularity also supports cross-disciplinary applications, as the architecture can be extended to solve problems in fields outside semiconductor electronics, such as physics, engineering, and other areas that involve differential equations with singular perturbations.

In conclusion, this software architecture represents a significant advancement in automated problem-solving for singularly perturbed systems. By combining advanced computational methods, artificial intelligence,

and cloud computing, the architecture provides a robust, scalable, and flexible framework that can be adapted to a wide range of complex mathematical problems. Future work could focus on expanding the system's capabilities by integrating more sophisticated machine learning techniques and exploring its applications in other domains, such as fluid dynamics or material science, where singularly perturbed problems frequently arise. This architecture sets the stage for future innovations in computational modeling, providing a powerful tool for researchers and engineers in multiple fields.

REFERENCES

- [1] Koroliuk D., Lyashko S., Limnios N. Computational Methods and Mathematical Modeling in Cyberphysics and Engineering Applications. – London: Wiley, 2024. – 442 p.
- [2] Bomba A., Moroz I. Analysis of Nonlinear Processes in P-I-N Diodes Plasma by the Perturbation Theory Methods // 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT-2023), Wroclaw, Poland, 2023, p. 117-120.
- [3] Colin Campbell, Ralph Johnson, Ade Miller, Stephen Toub. Parallel Programming with Microsoft® .NET: Design Patterns for Decomposition and Coordination on Multicore Architectures. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 224 p.
- [4] Evans E. Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software. – Boston: Addison-Wesley Professional, 2004. – 560 p.
- [5] Martinkus I., Heinrich C, Nagorny K., Tkachuk M. Evaluation of the Effectiveness of Domain Modeling Methods in Terms of Model Complexity // International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. – 2019. P. 2-4.
- [6] Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. – 2nd ed. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999. – 842 p.

# Application of Quantum Computing in Optimization Problems

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.033>

Viktor Borysiuk  
National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
[v.y.borysiuk@nuwm.edu.ua](mailto:v.y.borysiuk@nuwm.edu.ua)

Olha Michuta  
National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
[o.r.michuta@nuwm.edu.ua](mailto:o.r.michuta@nuwm.edu.ua)

**Abstract** – The article examines methods for applying quantum computing to solve optimization problems, which are critical in various fields such as logistics, finance, resource management, energy, and others. The potential of quantum algorithms, such as Grover's algorithm and Variational Quantum Algorithms (VQA), is explored for enhancing computational efficiency compared to classical methods. Quantum computing enables significant acceleration of optimal solution search processes and reduces the complexity of problems through parallel computing and quantum superposition.

**Keywords** – quantum computing, optimization, quantum algorithm, quantum variational algorithm, Grover's search.

Optimization problems find wide application in various areas of life. In many cases, optimization problems become so complex that classical methods cannot provide a fast or accurate solution. Quantum computing promises to solve this issue by exponentially speeding up certain computational tasks, making it a promising tool for solving optimization problems [1].

Optimization is one of the most common mathematical problems, applied across a wide range of fields: from economics and resource management to route planning in logistics and solving artificial intelligence tasks. Optimization problems involve finding the best possible solution under constrained resources, which requires fast and accurate computation. However, classical optimization methods face with serious limitations as the size of the problem increases, especially in cases where exponential computations are required.

With the development of quantum computing, new methods for solving optimization problems are emerging, potentially providing significant acceleration in the process of finding optimal solutions. [1] Quantum computing is based on principles of quantum mechanics such as superposition, entanglement, and quantum interference, allowing many possible solutions to be processed simultaneously. [2] This enables search and optimization tasks to be solved much faster than with classical computational methods.

Particularly promising are quantum algorithms such as Grover's quantum algorithm, which accelerates the search for optimal solutions, as well as Variational Quantum Algorithms (VQA), which combine classical

and quantum computing to improve results in optimization problems. Research and implementation of these quantum algorithms could lead to significant breakthroughs in optimization tasks across various fields where accuracy and speed play a critical role [3].

- The research methodology is based on the application of quantum algorithms for solving optimization problems, which includes both analytical and simulation modeling. The main quantum algorithms used in the study are effective for specific classes of optimization and search problems that exhibit exponential complexity when using classical methods. These algorithms include:

- **Grover's Quantum Algorithm.** This algorithm enables fast searching in unsorted databases or the space of possible solutions. [1] For classical algorithms, searching in an unsorted database requires  $O(N)$  operations, whereas Grover's algorithm can accomplish this in  $O(\sqrt{N})$  steps. This algorithm serves as the foundation for accelerating problems that involve finding the best solution among many possibilities, such as in combinatorial optimization problems.

- **Variational Quantum Algorithms (VQA).** One of the most widely used algorithms in this class is the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA). This algorithm combines elements of classical computations with quantum computations, providing optimization through a variational principle. [2] As a result, the quantum computing process finds optimal parameters for solving the problem by iteratively improving the quantum state. QAOA is used to solve discrete optimization problems, such as routing, knapsack, and placement problems.

- **Quantum Stochastic Search.** This method is based on quantum fluctuations, allowing for the exploration of a large space of possible solutions for optimization problems in fewer steps compared to classical stochastic methods. This approach is particularly effective for global optimization problems, where it is necessary to find the optimum in a large and complex search space.

- **Hybrid classical-quantum methods.** The research involves the use of both quantum and classical approaches to tackle complex optimization problems. [3] For example, a classical computer system may perform preparatory calculations, while a quantum computer handles the most challenging optimization operations,

such as finding the global minimum of a function. This hybrid model is employed to reduce overall complexity and computation time.

- **Simulations of quantum algorithms.** To perform modeling and testing of results, specialized software platforms for simulating quantum computations are used, such as IBM Q Experience, Google Cirq, and Microsoft Quantum Development Kit (QDK). [4] These platforms allow for checking and validating the results of quantum algorithms on classical computers, as well as optimizing them before deployment on real quantum systems.

The application of quantum algorithms has demonstrated advantages in solving certain classical optimization problems. For shortest path problems and resource allocation tasks, quantum methods show significant acceleration. [4] Variational quantum algorithms, such as the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA), have also shown good results in discrete optimization problems [3].

Quantum computing opens new avenues for solving complex optimization problems that are challenging to address using classical methods. Further research may lead to the implementation of quantum algorithms in practice and significant improvements in results for resource management, logistics, machine learning, and other fields [5].

### REFERENCES

- [1] Nielsen, M. A., Chuang, I. L. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, 2010.
- [2] Farhi, E., Goldstone, J., Gutmann, S., et al. *A Quantum Approximate Optimization Algorithm*, 2014. arXiv:1411.4028 [quant-ph].
- [3] Shor, P. W. *Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring*. Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 1994.
- [4] Grover, L. K. *A fast quantum mechanical algorithm for database search*. Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing, 1996.
- [5] Montanaro, A. *Quantum algorithms: an overview*. npj Quantum Information, 2, 15023, 2016

# *Hotel and accommodation booking management platform for travel in Ukraine*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.034>

Vitalii Kochura

Dept. of Software Engineering  
Faculty of Information and Computer Technology  
(FICT)  
Zhytomyr, Ukraine  
[ipzm241\\_kv@student.ztu.edu.ua](mailto:ipzm241_kv@student.ztu.edu.ua)

Tamara Loktikova

Dept. of Software Engineering  
Faculty of Information and Computer Technology  
(FICT)  
Zhytomyr, Ukraine  
[dfikt\\_ltn@ztu.edu.ua](mailto:dfikt_ltn@ztu.edu.ua)

Nadia Kushnir

Dept. of Software Engineering  
Faculty of Information and Computer Technology (FICT)  
Zhytomyr, Ukraine  
[kipz\\_kno@ztu.edu.ua](mailto:kipz_kno@ztu.edu.ua)

**Abstract** – A platform for hotel and accommodation booking management is proposed. The platform is built on a monolithic architecture using MVC and Client-Server patterns. The server side is implemented in the PHP programming language using the Symfony framework, and the client side is implemented using the React JavaScript library. The platform uses MySQL as the primary database, supplemented by MongoDB. The developed platform meets modern requirements and has the following features: modern and adaptive design, user-friendly interface with the ability to create a personal account, support for logging in via Google

**Keywords** – web platform; booking; accommodation; Symfony; React

## I. INTRODUCTION

Today's life is impossible to imagine without traveling, where the key to a comfortable vacation or business trip is to book accommodation in advance. Unfortunately, the current realities of our country have temporarily pushed traveling to the back burner. But everyone deserves a vacation, has the right to temporarily change their place of residence and get away from everyday worries. At the same time, many people travel not only to relax. There can be various reasons for this: study, work, business meeting, etc. The question arises - how to book accommodation?

The solution to this problem is a platform that will allow booking accommodation that meets the client's needs, as well as posting their places for accommodation to owners. It will allow users to find the right accommodation, compare prices, and view reviews, making their search easier and faster.

Such a platform will not only save time, but will also provide an opportunity to choose from a wide range of options, which will allow you to find housing that best meets the user's requirements.

## II. REVIEW AND ANALYSIS OF SOFTWARE ANALOGUES

There are a sufficient number of analogues of the software product on the market. In order to formulate the requirements for the developed platform, we analyzed popular products and identified their advantages and disadvantages.

One such application is Hotels24.ua (<https://hotels24.ua/>), a free accommodation booking service in Ukraine that offers a wide range of hotels and convenient tools for searching, filtering and sorting offers. However, the site has an outdated design, no Google login, and does not support user accounts.

GoHotels (<https://gohotels.com.ua/>) is also a free online accommodation booking service in Ukraine that offers an interactive map, a personal account, and a page of announcements and events. However, like the previous product, the website has an outdated design and does not support responsiveness, and there is no Google login.

HOTELS-OF-UKRAINE (<https://www.hotels-of-ukraine.com/>) is a website with a pleasant and responsive design that offers a large number of options for booking accommodation and an interactive map with nearby attractions and restaurants. Among the disadvantages is the lack of authorization on the site, and therefore the possibility of cooperation (in particular, creating an account of the owner of the place of residence).

Table 1 shows the comparative characteristics of existing analogs of the proposed platform.

Based on the review and analysis, the hotel and accommodation booking management system should have a modern and responsive design, a user-friendly interface with the ability to create a personal account, and support Google login. Important functions include a search, filtering, and sorting system, an image gallery, an interactive map with the location of accommodation, and the ability to cooperate with accommodation owners.

TABLE I. COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF ANALOGUES

Name	Hotels24.ua	GoHotels	HOTELS-OF-UKRAINE
Attractive and user-friendly interface	-	+-	+
Search, filter, sort	+	+	+
Image gallery	+	+	+
Feedback system	+	+	+
Map with the location of the housing	+	+	+
Personal account	-	+	-
Opportunity to cooperate with the owners of places of residence	+	+	-
Ability to log in via Google	-	-	-
Responsive design	+-	-	-

III. PURPOSE OF THE WORK

The purpose of the work is to research the development of a web platform that allows you to easily and quickly find the right place to stay, taking into account the wishes and requirements for it, and eventually make a reservation. The system includes different roles, each of which has its own functionality and participates in different processes. Within the system, clients can perform certain actions related to accommodation (view, book, leave feedback, etc.), owners can post new places to stay, add rooms to them, and monitor bookings.

In general, the software product simplifies the entire process of searching for and booking accommodation and provides the necessary business tools for accommodation owners, which allows them to improve service and optimize management.

IV. PLATFORM CONSTRUCTION AND DESIGN

One of the most important and crucial stages in the design of any software product is the selection of an appropriate architecture that determines performance, scalability, and usability during development. A monolithic architecture turned out to be the most suitable. We used such architectural patterns as MVC and Client-Server.

MVC is a pattern that allows you to divide an application into logical components and efficiently manage data, output, and system logic, while facilitating development, testing, and support.

Client-Server is an architectural pattern that divides a system into two main parts: client and server. The client is responsible for user interaction, request processing, and data display, while the server implements business logic, data storage, and processing.

Communication between the server and the client is carried out via HTTP requests using the RESTful API.

The PHP programming language was chosen to develop the server side.

PHP has a fairly large number of frameworks that greatly simplify and speed up development. One of them is Symfony [1]. Its modular component system is flexible enough to perform standard tasks without writing long code. At the same time, it provides a high level of software security and stability.

To optimize the processing of requests, we chose the API Platform framework, which provides a full set of tools for efficient and fast work with APIs in accordance with modern standards.

To implement the client side, the most popular JavaScript library - React [2] was chosen. It is used to quickly and efficiently create interactive user interfaces and web applications using much less code than with conventional JavaScript.

Nginx was chosen as the web server. It is characterized by high performance, the ability to efficiently handle a large number of simultaneous connections, and reliability.

To deploy the application, we use Docker [3], which allows us to present system components in the form of containers, easily manage and scale them. One of the key advantages is the isolation of these components and their dependencies, which guarantees stable operation of the system. Using Docker has significantly increased the efficiency and speed of software development.

The proposed platform uses the MySQL database management system [4]. It is user-friendly, easy to understand, and quite popular, so you can easily find the necessary documentation. MySQL is known worldwide as the most secure and reliable database management system used in various web applications.

In addition, the system also uses the MongoDB database [5]. It is the best choice for storing temporary or large data. MongoDB is known for its flexibility and scalability, which makes it possible to efficiently process large amounts of information and quickly perform write and read operations. This makes it an ideal complement to the main MySQL relational database in the proposed system.

As a result, a database was designed to ensure the storage and efficient management of information about hotels, accommodation types, rooms, amenities, reservations, etc. The database contains 18 tables, the main ones being:

- The “**user**” table contains data on system users (email, first name, last name, password, role, availability, two-factor authentication status, etc.)



## Modeling, control and information technologies – 2024

- The “**property**” table describes the entity of the places to stay that users will book (name, description, locality, latitude, longitude, rating, verification status, etc.)
- The “**room**” table describes the entity of the rooms that are located in the places of accommodation (room type, number of guests, price per night, etc.).
- The “**booking**” table contains information about the reservation (data about the person for whom the reservation was made, status, date of arrival, date of departure, etc.).
- The “**transaction**” table contains data on transactions created during booking (amount of the transaction, its status, date of payment, etc.).

In turn, MongoDB is used to store logs and create a temporary user entity at the time of registration. It consists of 2 collections.

Figures 1-4 show the interface of the main functionality of the developed platform.

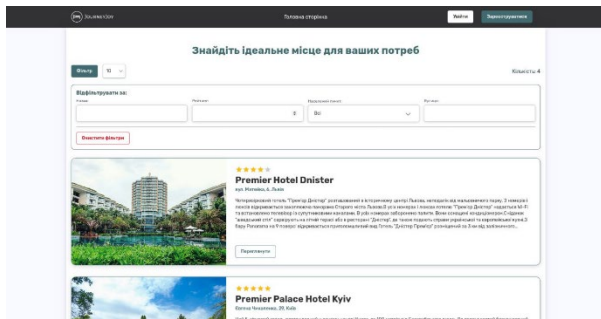


Figure 1. Home page with residence search

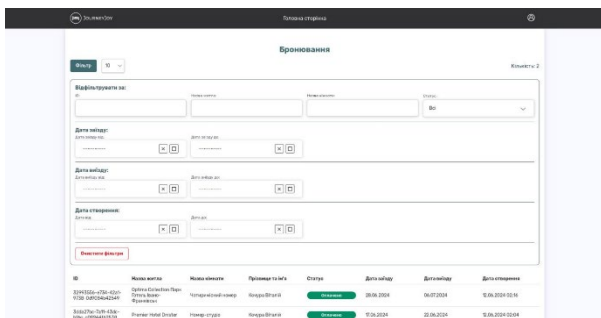


Figure 2. User account. List of bookings

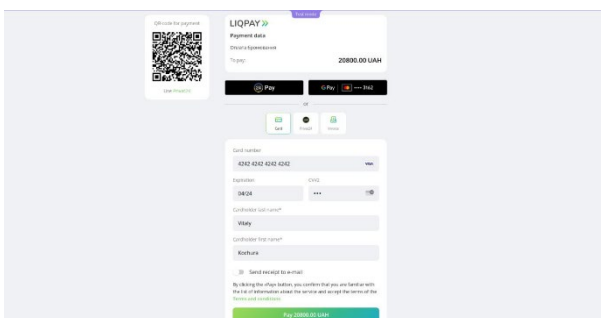


Figure 3. LiqPay payment form

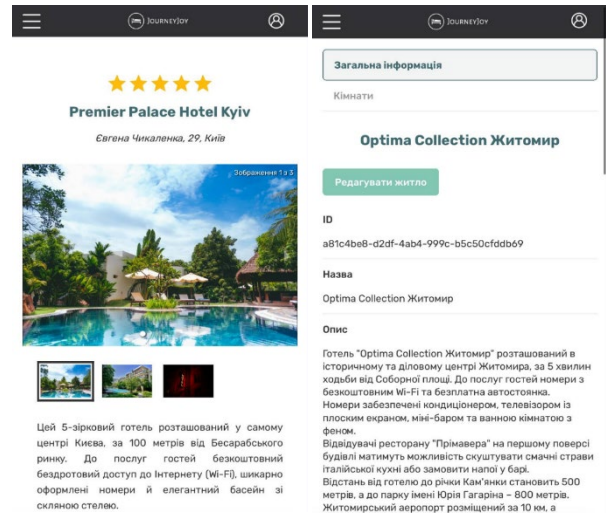


Figure 4. Application adaptability

During the development of the software product, special attention was paid to testing and error handling, which significantly improved the reliability and security of the system. Thanks to thorough validation of forms, the use of loaders for buttons and filters, and the blocking of inaccessible actions, the application is intuitive and stable. This comprehensive approach to handling errors and preventing unwanted user actions improved the overall user experience and minimized the possibility of errors in the process of interacting with the system.

## V. CONSLUSIONS

As a result of the development, a finished software product was obtained that meets the formulated requirements and expectations of users. The implementation of such a platform for managing hotel and accommodation bookings for travelers in Ukraine will provide a convenient booking process, improve customer service and simplify the process of managing accommodation.

## REFERENCES

- [1] Symfony documentation [Online]. Available: <https://symfony.com/doc/current/index.html>. [Accessed: October 12, 2024].
- [2] React documentation [Online]. Available: <https://react.dev/>. [Accessed: October 12, 2024].
- [3] Docker documentation [Online]. Available: <https://docs.docker.com/>. [Accessed: October 12, 2024].
- [4] MySQL documentation [Online] - Available: <https://dev.mysql.com/doc/>. [Accessed: October 12, 2024].
- [5] Build PHP Symfony Apps with MongoDB Atlas [Online] - Available: <https://mongodb-developer.github.io/symfony-mongodb-rental-workshop/>. [Accessed: October 12, 2024].

# Authentication and authorization in microservice oriented application design

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.035>

Yurii Kovalov

Department of Computer Engineering Faculty of Radiophysics, Electronics and Computer Systems  
Taras Shevchenko National University of Kyiv  
Kyiv, Ukraine,  
yuk123@meta.ua

**Abstract** – In the past years microservice oriented design patterns obtained much popularity among the system architects and programmers. One of the obstacles in this design is authentication and authorization issues. This article presents one of the possible solutions for this problem. The essence of this methodology is a single point of authentication and many points of authorization spread across all the microservices.

**Keywords** – microservice; authorization; authentication; monolith; application design;

## I. INTRODUCTION

Recently microservice oriented application design obtained much popularity among the software architectures and engineers. It introduces a lot of advantages compared to monolith application design but has drawbacks too. The main advantages are the possibility to break down business processes to parts that can be implemented by different teams and reducing the complexity of every part of application. One of the drawbacks is an increased complexity of authentication and authorization procedures.

The point is that with monolith design developers have to protect only the periphery of application while with microservices there are many peripheries to protect. Authorization in monolith applications is usually centralized, while with microservices design every microservice must authorize user's queries by itself.

Scientists tried different approaches in their studies. Two separate microservices for authentication and authorization were proposed, while investigating performance with SQL and No-SQL databases [1]. Another study investigated a common approach to access control authorization. Authorization rules were shared between different microservices [2]. In the next study an attribute based JSON access control policy language was proposed [3]. As concluded in the next study, there are not many studies in the subject and much less studies demonstrating practical implementation of authentication and authorization with microservice architecture [4].

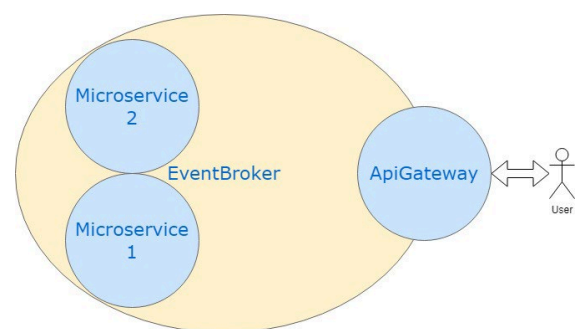
## II. APPLICATION DESIGN

### A. Interaction inside application

In this study some methodological recommendations in the authentication and authorization when dealing with microservice oriented application design were outlined. These recommendations are based on practical implementation of microservice systems for finance and accountancy.

As usual business processes in the realm of accountancy and finance are implemented very well with monolith application design. The benefits we would possibly receive from microservice design are easier support and maintenance. So let's try to implement microservice design including authentication and authorization to take advantage of both approaches simultaneously.

The idea is to implement a microservice application in such a way that it should look like a monolith for customers but behave like a microservice for programmers. In order to fulfill this the proposed methodology will construct a microservice application with one single entrance point – let's call it ApiGateway (Fig.1). All microservices are interacting with each other and users within a private secure network by sending events through EventBroker. ApiGateway authenticates users and passes out events to and from microservice applications and uses SSL (Secure Socket Layer) to



communicate with end users.

Figure 1. Authentication schema

It is crucial for systems to operate as quickly as possible inside the enclosed private network. One user’s query may pass through multiple microservices before the answer is ready. In our methodology we don’t recommend using encryption between microservices because it will inevitably slow down events flow. The private network is protected by firewalls and VPN (Virtual Private Network) gateways. The same mechanisms were used for monolith applications and they demonstrated effectiveness and robustness. Just like in monoliths we protect only the periphery and gates of microservice application.

**B. Authorization**

As already mentioned above one of the main advantages in microservice application design is the possibility of implementing microservice functions by different teams. Hence every microservice should be as independent from others in design as possible. The central part of any application is authorization. In this methodology every microservice is responsible to keep authorization information for every user in the system. Of course in this situation the default (no information about authorization) is denying access to resources.

The first authorization rule every microservice should implement is authorizing other authorization rules change. Let’s look at the example with menu

id	labelname	clientid	userid	expiredatetime	userdatetime
1	Can give access for others	1	2000-12-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=1),(Userid=1)
2	Access payslip workers menu	4	2000-12-31 00:00:00.000000	64841	(Clientid=4)
3	Access payslip students menu	2	2000-12-31 00:00:00.000000	64841	(Clientid=2)
4	Access user claims index	3	2000-12-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=3)
5	Access balances	2	2023-07-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=2),(Userid=1)
6	Can give access for others	1	2023-07-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=1),(Userid=1)
7	Access payslip workers menu	4	2023-08-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=4)
8	Access payslip students menu	2	2023-07-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=2)
9	Access granted	2	2023-08-01 00:00:00.000000	1	(Clientid=2)
10	Access granted	5	2023-08-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=5)
11	Access granted	2	2023-08-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=2)
12	Access granted	5	2023-08-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=5)
13	Access granted	2	2023-08-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=2)
14	Access granted	5	2023-08-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=5)
15	Access granted	3	2023-08-31 00:00:00.000000	1	(Clientid=3)

microservice authorization rules (Fig. 2).

Figure 2. Authorization rules example.

The first authorization rule in the table sets access to users in giving authorization access for other people. Other rules are authorizing access to different parts of menu in microservice application.

All rules can be managed by authorized persons using a micro frontend interface that accumulates authorization rules from all microservices (Fig.3).

Figure 3. Authorization rules managing microservice.

It is essential to build this micro frontend interface with respect to possibility of changing it by every team independently, thus implementing microservice logic they would not intertwine with each other.

REFERENCES

- [1] Randa Ahmad Al-Wadi and Adi A. Maaita (2023) “Authentication and Role-Based Microservice Architecture: A Generic Performance-Centric Design”, Journal of Advances in Information Technology, Vol. 14, No. 4, November 2023, pp. 758-768 doi: 10.12720/jait.14.4.758-768. J. Clerk Maxwell, “A Treatise on Electricity and Magnetism,” 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.
- [2] Algimantas Venčkauskas, Donatas Kukta , Šarūnas Grigaliūnas and Rasa Bruzgiene (2023) “Enhancing Microservices Security with Token-Based Access Control Method”, Sensor, 23, 3363, pp. 1-21, doi: 10.3390/s23063363.
- [3] Davy Preuveeners and Wouter Joosen (2017) “Access Control with Delegated Authorization Policy Evaluation for Data-Driven Microservice Workflows”, Future Internet, 2017, 9, 58, doi: 10.3390/fi9040058.
- [4] Murilo Góes de Almeida and Edna Dias Canedo (2022) “Authentication and Authorization in Microservices Architecture: A Systematic Literature Review”, Applied Sciences, 2022, 12, 3023, pp. 1-20, doi: 10.3390/app12063023

# Optimizing High-Load Systems with Asynchronous Programming Techniques

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.036>

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 document focuses on a critical issue in modern application - performance. The goal is to find the best way to improve the efficiency of these systems, with a particular focus on smart home management applications. As the popularity of such systems grows rapidly, enhancing their performance is becoming necessary. To address this need to explore existing challenges and evaluates various solutions. The proposed asynchronous programming approach to solve the listed problems. Performance tests showed the efficiency of this method in comparison with other approaches.

**Keywords** – scalability; high-load systems; programming techniques; response time; system architecture;

## I. INTRODUCTION

More and more modern applications are becoming highly loaded due to growing demand. From cloud computing platforms to smart home control systems, these environments must efficiently handle huge amounts of data and numerous simultaneous requests. However, as user expectations continue to rise, the performance of these systems can become a significant issue, leading to slow response times and potential service disruptions [1].

Smart home control systems are considered high-load due to the growing number of connected devices and the constant flow of data they generate. With the spreading of IoT devices such as smart thermostats, security cameras, and voice assistants, these systems must manage and process huge amounts of real-time information from multiple sources simultaneously. This constant exchange of data requires significant computing resources, especially during peak usage times when multiple devices are accessed simultaneously.

This document considers various strategies for enhancing the performance of high-loaded systems. We will examine key concepts such as asynchronous programming techniques, load balancing and efficient resource allocation [2]. All these methods can improve system responsiveness, increase throughput, and deliver a better user experience.

## II. PROBLEM STATEMENT

As the amount of smart home management systems continues to rise, these platforms face significant challenges in maintaining optimal performance under high-load conditions. The increasing number of connected devices generates huge amounts of real-time data, leading to potential problems in data processing and system responsiveness. Users expect immediate and seamless interactions with their smart home systems; however, performance issues such as delayed responses, increased latency, and system slowdowns can negatively impact user experience and satisfaction [3].

Moreover, traditional approaches to system design may not properly address the complexities of high-load environments, resulting in inefficient resource allocation and suboptimal performance. Therefore, there is a pressing need to identify and implement effective optimization strategies to enhance the performance of smart home management systems. This document seeks to explore various methods for improving the efficiency and reliability of these systems, ensuring they can meet the demands of an ever-growing user base while delivering a seamless and responsive experience.

## III. OVERVIEW OF EXISTING SOLUTIONS

To identify the most effective solution for improving performance, it's essential to conduct a thorough review of the available options.

Load balancing is a key technique used to enhance the performance and reliability of high-load systems. It involves distributing incoming network traffic or computing tasks across multiple servers or resources to ensure no single server is overwhelmed, which can lead to performance degradation or system failure. By balancing the load, systems can handle large volumes of requests more efficiently, minimize latency, and increase overall availability [4].

In addition to improving performance, load balancing also enables horizontal scaling, which allows the system to add or remove resources dynamically based on demand. This is essential for systems that works with high traffic and need to maintain optimal performance under varying loads.

In summary, implementing load balancing in an application can range from a low-effort task in simple setups using cloud-managed services to a more involved process in complex environments requiring custom configuration and fine-tuning.

Efficient resource allocation is a critical strategy for improving the performance and scalability of high-demand systems. It involves optimizing how system resources—such as CPU, memory, storage, and network—are assigned to various tasks or processes to ensure that workloads are handled effectively without overloading specific resources [5]. It can significantly boost performance by preventing bottlenecks, reducing idle time, and maximizing the use of available infrastructure.

Database optimization is one more way improving the performance of applications, particularly those that are heavily data-driven. Inefficient database operations can lead to slow query response times, increased server load, and poor user experiences [6]. Optimizing a database involves various techniques that improve query execution, reduce resource consumption, and enhance the overall responsiveness of the system. The goal is to minimize the time it takes to retrieve, update, or insert data, while also ensuring scalability and stability as the amount of data grows.

#### IV. PROPOSED SOLUTION

Asynchronous programming is a powerful approach to improving the performance of high-demand systems by allowing tasks to run concurrently without blocking the execution of other tasks. Unlike synchronous programming, where tasks are executed sequentially, asynchronous programming enables a system to handle multiple operations simultaneously, resulting in faster response times and more efficient use of resources [7]. How asynchronous programming can enhance performance:

- non-blocking operations: instead of waiting for an operation to complete (such as I/O tasks or network requests), it allows other tasks to continue executing;
- concurrency: enables multiple tasks to run in parallel, maximizing the use of system resources like CPU and memory;
- event-driven architecture: using of event loops or callbacks to manage tasks. This allows the system to react to the completion of a task without constantly polling for updates;
- scalability: by handling more operations concurrently, asynchronous systems can scale more efficiently, especially in web servers or applications handling numerous client requests simultaneously;
- lower resource usage: asynchronous tasks consume fewer system resources compared to synchronous multi-threading.

Compared to synchronous programming, asynchronous programming offers better performance in

I/O-bound applications, as it allows the system to handle multiple operations without waiting for each to complete. However, for CPU-bound tasks, the performance improvement may be less noticeable since tasks still need to be processed sequentially on a single CPU core. When compared to load balancing or efficient resource allocation, asynchronous programming shines in cases where reducing idle time and improving concurrency are key. Load balancing focuses more on distributing traffic across resources, and resource allocation optimizes resource usage, while asynchronous programming optimizes the task execution flow.

Asynchronous programming requires more thought in implementation compared to synchronous programming, especially in handling concurrency, error handling, and potential deadlocks. However, modern languages like C# provide excellent abstractions that significantly reduce complexity, making it easier to implement than manual thread management or multi-threaded approaches.

#### CONCLUSION

To optimize the performance of high-load systems exist several methods, each targeting different aspects of system architecture and operation. Load balancing ensures even distribution of traffic across servers, improving both reliability and scalability. Efficient resource allocation optimizes how system resources like CPU, memory, and storage. Database optimization enhances the performance of data-driven applications by improving query execution, indexing, and structuring data for faster access.

In addition to these, asynchronous programming stands out as one of the most effective methods for optimizing performance, particularly in high-load environments. By allowing multiple tasks to execute concurrently without blocking each other, asynchronous programming can reduce idle time spent waiting for I/O operations, network responses, or database queries. In contrast to traditional synchronous programming, where processes are sequential, asynchronous operations free up system resources to handle other tasks while waiting for responses.

#### REFERENCES

- [1] M. Abbott, M. Fisher, “The Art of Scalability: Scalable Web Architecture, Processes, and Organizations for the Modern Enterprise” Addison-Wesley Professional, pp. 80–120, June 2015.
- [2] A. S. Tanenbaum, M. van Steen, “Distributed Systems: Principles and Paradigms” Prentice Hall PTR, pp. 21–44, February 2016.
- [3] T. Wiktorski, “Data-intensive Systems: Principles and Fundamentals using Hadoop and Spark” Springer, pp. 53–71, January 2019.
- [4] P. Membrey, E. Plugge David Hows, “Practical Load Balancing: Ride the Performance Tiger” Apress, pp. 173–195, March 2012.
- [5] M. Kleppmann, “Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems” O’Reilly Media, pp. 246–307, May 2017.
- [6] A. Z. Choudhury, “Database Performance Tuning and Optimization” CreateSpace Independent Publishing Platform, pp. 78–124, September 2014.
- [7] S. Cleary, “Concurrency in C# Cookbook” O’Reilly Media, pp. 183–241, October 2019.



# Generative AI text summarization performance analysis prospects

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.037>

Oleksandr Tsypliak

Computer Science PhD student,  
G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy  
Engineering  
Kyiv, Ukraine  
saifbant@gmail.com

Volodymyr Artemchuk

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,  
G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy  
Engineering  
Kyiv, Ukraine  
ak24avo@gmail.com

**Abstract** – AI investment world trends analysis in scope based on venture investments timeline by domain visualization and researches proves that not all AI-agent development projects are successful. The current paper describes an AI-agent performance analysis approach based on LLM-specific metrics and scenario-specific metrics. The AI-agent for highlights generation is in focus as an object of performance analysis.

**Keywords** – large language model, performance analysis, metrics, performance optimization, generative artificial intelligence, LLAMA 2.

## I. INTRODUCTION

Generative artificial intelligence chatbots based on LLM (large language model) popularity increased awareness about its usage possible advances among stakeholders all over the world.

Academic researches [1] emphasize on prospects of its application for data processing related automations. When social media [2] call it “anything tool” and discuss its perspectives on different human work automation.

On the other hand, following Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) AI statistics about worldwide venture investments in AI the peak was in 2021 and it covered all investigate domains including [3]:

- Education and training
- Digital security
- Logistics, wholesale and retail
- Robots, sensors, IT hardware
- Financial and insurance services
- Business processes and support services
- Media, social platforms, marketing
- IT infrastructure and hosting
- Healthcare, drugs and biotechnology
- Mobility and autonomous vehicles
- “Other” as separate category uncovered above

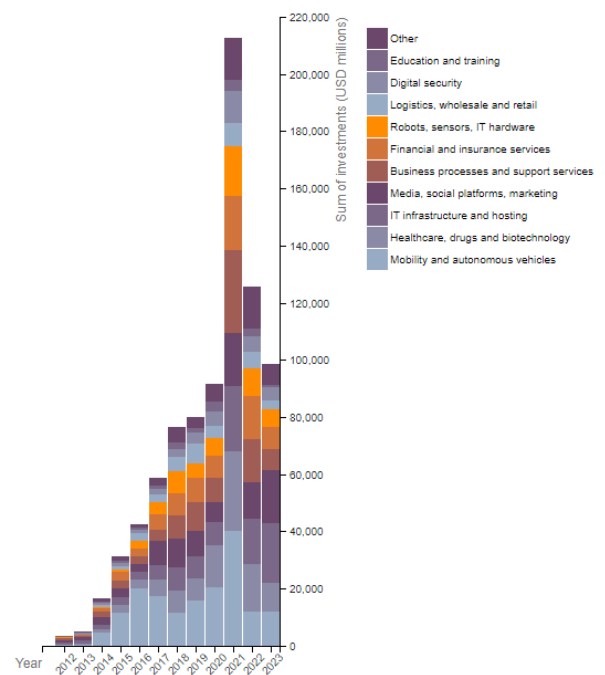


Figure 1. Venture capital investments into AI by domains years trend in million dollars [3]

Since 2022 worldwide venture investments volume decreased, which can be partially explained by the ongoing Russo-Ukrainian War. But the trend of 2023 showed that all domains except “Media, social platforms, marketing” and “IT infrastructure and hosting” are getting less and less investments getting back to the level of 2020. Worth mentioning that yearly venture investments by years is a high-level metric, specifying only investments into new businesses and projects.

Considering the high complexity and the risks of each software development project involving LLM usage [4] possible key root cause of the investments volume decrease, a consequence of lower interest in starting new projects, may be back in 2021 initiated projects failures.

Among other reasons, there is a problem of the performance evaluation of the selected LLM used inside the designed AI agent application. There are four aspects of performance in this context:

## Modeling, control and information technologies – 2024

- Ability to resolve specific task
- Ability to follow respond in required time boundaries
- Ability to be hosted in bounds of pre-calculated hardware resources
- Ability to serve the required number of users following functional and non-functional system requirements

The current paper is focused on the problem of an autonomous LLM as a component of AI agent performance metrical measurement in the context of a single specific prototype created for text summarization.

### II. DETAILED PROBLEM DEFINITION

As an example of an AI-agent for performance analysis let's consider REST API behind the application for highlights generation described in detail in the separate article [5].

From the architecture point of view, the application is a wrapper around the self-hosted LLAMA 2 model. Briefly about its functionality:

1. Agent cuts the full text of the application into paragraphs
2. Each paragraph text got sent to LLM with an inbuilt prompt to LLAMA 2
3. The output of the prompt got analyzed using text algorithm and sent back to LLAMA 2 with another prompt
4. Steps 2 – 3 repeated for the chain of prompts
5. Final output got recorded into the document with the original full text of the article as a highlight

LLM performance analysis in context of this prototype has 3 dimensions of metrics related to:

1. Model ability to serve specific generalized tasks
2. Scenario-focused functionality – evaluating the quality of the output
3. Hardware resource consumption by self-hosted LLM
4. Multithread usage of the agent by multiple users simultaneously

### III. RESEARCH RESULTS

Let's review some of the most relevant approaches to each of these dimensions that are most relevant to the mentioned AI agent and design several more specific metrics.

#### A. Model ability to serve specific generalized tasks

Unlike early limited neural language models (NLMs) modern transformer-based neural language models contain many more parameters and are pretrained on the large amounts of data. These modern task-agnostic systems are referenced as LLMs (large language models). [6]

The problem with LLMs is that technically each of them can be used to resolve any text generation/analysis task. But a rich variety of available models has different architecture and different strong and weak sides. There are already academically described multiple examples of AI-agent development projects that failed because of wrong model selection. [7]

So, on the system design level the most suitable one should be selected based general tasks list inherited from the functional and non-functional requirements of the system.

In the context of highlights generating application, we can specify LLM capabilities used to resolve this task:

- Comprehension related
  - Text summarization
  - Text simplification
  - Reading comprehension
- Knowledge utilization
  - General world knowledge reference
  - Ability to use attached text resources
- Emergence related:
  - Common sense logical reasoning
  - In context learning

Understanding the scope of tasks to the cover optimal model can be selected by collecting metrics that will give each of the alternative LLMs a score. [8] To collect such metric steps below should be followed:

1. Select/design datasets relevant to the listed general tasks resolution
2. Apply data set to collect specific metrics in the context of each selected data set
3. Apply exactly same datasets and metrics collection techniques to alternative LLMs

There are publicly available “leaderboards” containing some most popular models in the context of metrics. For example, a board from “Artificial Analysis” platform [9]. However, using this data for research or commercial project is a high risk because the specification of process and raw data for calculating specific metric for specific model is not publicly available and consequently can't be fully trusted.

Moreover, each dataset unitization generates additional exclusive metrics that are not published at all for simplification.

Datasets most relevant to highlights generation AI-agent tasks mentioned above:

- MMLU [10] to assess general knowledge and problem-solving ability
- TriviaQA [11] to check Wikipedia knowledge high-quality access

## Modeling, control and information technologies – 2024

- RACE [12] reading comprehension quality verification
- HellaSwag [13] accessing commonsense
- TruthfulQA [14] for common misunderstanding verification during text summarization and simplification

Most relevant metrics:

- GLUE score [15] for verification of logical reasoning using attached text and context learning
- ROUGE [16] summarization tasks evaluation
- Fluency – human-measured metric to measure clarity of the LLM answer

### B. Scenario focused functionality

LLM utilization libraries allow to use alternative models once they are formatted properly without system redesign and even major configuration changes.

In the scope of scenario-based verification in the context of highlight generation AI-agent two aspects should be measured:

1. Answer generation time
2. Answer quality

For this purpose, should be designed a set of paragraphs with human written correct summaries. Initial should be created manually, possibly extended using potentially most suitable model and then verified by humans. Then use it for analysis:

1. Using an automated test each such paragraph should be summarized by the AI-agent using alternative LLMs.
2. Compare the quality of each answer using text algorithms compared to correct human-written one and measure processing time.
3. Use processing time in seconds of each answer in seconds by percentiles for aggregating statistics for all answers by specific LLM and the same for quality % percentile
4. Based on collected statistics select most suitable model.

### C. Hardware resource consumption by self-hosted LLM

As mentioned in section B. run the AI-agent using an alternative model and using a hardware metrics monitoring agent like Telegraph to measure server-side performance metrics mentioned below. Store metrics in time series database like influx and the visualize the timeline using visualization tool like Grafana.

Metrics to measure that are mostly consumed by LLMs:

- Available CPU %
- Available RAM in megabytes
- Read/Write disc time % usage

Once monitoring is configured the test mentioned in section B can be executed and hardware metrics collected during periods of those tests can be compared as visualized timelines.

The model consuming the least RAM, CPU and disk time will be the best alternative as most efficient and cheap for hosting.

### D. Multithread usage of the agent by multiple users simultaneously

Using the scenario designed in the scope of section B run a multithread test and monitor hardware metrics as explained in section C.

But for the current highlight generation task on the current stage of development that was impossible to perform, because a single threaded run occupies 100% of CPU time. As is parallel process run leads to failure which shows prospects of optimization.

## IV. CONCLUSION

Venture investment statistics clearly demonstrated, that not all domains that started to utilize LLM-based AI were able to keep their investors.

Multiple researches show that not all domains AI utilization kept the phase of growing after GPT 3 first release. This makes the problem of LLM-based AI-agents performance analysis worth attention.

The analysis should be conducted:

1. On the stage of design, to determine the best alternative LLM using general tasks specific metrics
2. On the stage of user acceptance testing, to collect metrics relevant to the specific scenario of AI agent usage.

The result of the work is determined process of performance analysis in the context of the specific AI-agent designed for highlights generation.

Implementation of such analysis with raw data collection and description is in the scope of further publications.

## REFERENCES

- [1] Pallathadka, H., E.H. Ramirez-Asis, T.P. Loli-Poma, K. Kaliyaperumal, R.J.M. Ventayen, and M. Naved. "Applications of Artificial Intelligence in Business Management, e-Commerce and Finance." *Materials Today: Proceedings* 80 (2023): 2610–13. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.419>.
- [2] Huang, Haomiao. "How ChatGPT Turned Generative AI into an 'Anything Tool.'" *Ars Technica*, August 2023. <https://arstechnica.com/ai/2023/08/how-chatgpt-turned-generative-ai-into-an-anything-tool/>.
- [3] Co-operation, Organisation for Economic and Development. "Total VC Investments in AI by Country and Industry," 2024. <https://oecd.ai/en/data>.
- [4] Tsypliak O.O., Artemchuk V.O. Risks Using LLM-Based Platforms in Energy Digitalization Context. Energy security in the digital transformation era, V scientific-practical conference of the G.E. Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering National Academy of Sciences of Ukraine : materials (Kyiv, November 22, 2023). Kyiv: PIMEE NAS of Ukraine, 2023. p. 123-125.
- [5] Tsypliak, Oleksandr, and Volodymyr Artemchuk. "Console Application Development for Articles' Highlights Generation

## Modeling, control and information technologies – 2024

- Based on Artificial Intelligence Designed Using Autonomous Large Language Model.” In *Information Technology for Education, Science, and Technics*, 53–64. Springer Nature Switzerland, 2024. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_5)
- [6] . Minaee, Shervin, Nal Kalchbrenner, Erik Cambria, Narjes Nikzad, Meysam Chenaghlu, and Jianfeng Gao. “Deep Learning Based Text Classification: A Comprehensive Review.” *arXiv*, 2020. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2004.03705>.
- [7] Fotheringham, D., and M.A. Wiles. “The Effect of Implementing Chatbot Customer Service on Stock Returns: An Event Study Analysis.” *Journal of the Academy of Marketing Science* 51, no. 4 (2023): 802–22. <https://doi.org/10.1007/s11747-022-00841-2>.
- [8] Minaee, Shervin, Tomas Mikolov, Narjes Nikzad, Meysam Chenaghlu, Richard Socher, Xavier Amatriain, and Jianfeng Gao. “Large Language Models: A Survey.” *arXiv*, 2024. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2402.06196>.
- [9] Platform, Artificial Analysis. “LLM Leaderboard - Compare GPT-4o, Llama 3, Mistral, Gemini & Other Models \textbar Artificial Analysis,” 2024. <https://artificialanalysis.ai/leaderboards/models>.
- [10] Hendrycks, Dan, Collin Burns, Steven Basart, Andy Zou, Mantas Mazeika, Dawn Song, and Jacob Steinhardt. “Measuring Massive Multitask Language Understanding.” *arXiv*, 2020. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2009.03300>.
- [11] Joshi, Mandar, Eunsol Choi, Daniel S. Weld, and Luke Zettlemoyer. “TriviaQA: A Large Scale Distantly Supervised Challenge Dataset for Reading Comprehension.” *arXiv*, 2017. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1705.03551>.
- [12] Lai, Guokun, Qizhe Xie, Hanxiao Liu, Yiming Yang, and Eduard Hovy. “RACE: Large-Scale ReAding Comprehension Dataset From Examinations.” *arXiv*, 2017. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1704.04683>.
- [13] Zellers, Rowan, Ari Holtzman, Yonatan Bisk, Ali Farhadi, and Yejin Choi. “HellaSwag: Can a Machine Really Finish Your Sentence?” *arXiv*, 2019. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1905.07830>.
- [14] Lin, Stephanie, Jacob Hilton, and Owain Evans. “TruthfulQA: Measuring How Models Mimic Human Falsehoods.” *arXiv*, 2021. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2109.07958>.
- [15] Wang, Alex, Amanpreet Singh, Julian Michael, Felix Hill, Omer Levy, and Samuel R. Bowman. “GLUE: A Multi-Task Benchmark and Analysis Platform for Natural Language Understanding.” *arXiv*, 2018. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1804.07461>.

# *The Case for Asynchronous Language Support API in an Integrated Development Environment*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.038>

Yurii Turbal

National University of Water and Env. Engineering  
Rivne, Ukraine  
turbaly@gmail.com

Igor Kushnir

National University of Water and Env. Engineering  
Rivne, Ukraine  
igorkuo@gmail.com

**Abstract**—This paper explains why adding Language Server Protocol support to an existing integrated development environment requires replacing its synchronous language support API with an asynchronous one. We explore the possibility of reusing language support code of other applications during the transition to the asynchronous API. And finally, we envision substantial additional benefits of such a transition.

**Keywords**—integrated development environment; Language Server Protocol; asynchronous API

## I. INTRODUCTION

Software engineers rely heavily on their integrated development environments (IDEs). Functionality, convenience, and performance of an IDE can have significant impact on an engineer’s productivity, speed and quality of software development.

Most modern IDEs are large and complex applications. They are often developed for decades by software engineering teams that change over time. A new IDE must overcome high barriers of entry to compete with existing applications and to become widely used.

Perhaps the most important and difficult problem of IDE development is programming language support. Saving effort on this problem is paramount for an IDE that supports multiple programming languages, especially when the languages evolve over time.

Language Server Protocol (LSP) is currently without alternatives in terms of the number of programming languages that can be supported with little effort. Compared to the code bases of most popular IDEs, the protocol is very young – its standardization process started only in 2016. But the protocol’s success is tremendous: in the early 2020s the LSP became a de-facto standard in the IDE market [1].

KDevelop is a well-established free/libre, cross-platform IDE. This IDE currently supports four programming languages well: C++, C, Python, and PHP. KDevelop’s language support architecture dates back to 2007 and is not compatible with the much newer LSP standard.

## II. RELATED WORK

Paper [2] aims to reduce the effort required to implement IDE support for less popular programming languages and proposes a new parse-based design for language servers. Paper [3] analyzes the implementations of existing language servers and synthesizes implementation practices. Paper [4] describes writing a new IDE from scratch using the LSP.

However, the problem of integrating the LSP into an existing IDE is insufficiently researched and documented. This paper aims to fill the gap. Improving an existing IDE circumvents the high barriers of entry and has an immediate positive impact on the productivity of software engineers that use it.

## III. OVERVIEW OF THE LANGUAGE SERVER PROTOCOL

In order to perform its functions, e.g. syntax highlighting, code completion, navigation, an IDE must “understand” programming languages. Traditionally each IDE implemented language support separately and independently from other IDEs. At best, an IDE provided a custom application programming interface (API) to language module (plugin) developers. The work required to support  $n$  languages in  $m$  IDEs was then  $O(n \cdot m)$ . Popular programming languages are never complete, new standard versions are released regularly. Therefore, language support code has to be regularly revised and updated. In practice, this meant that an IDE supported well at most a tiny number of languages.

The idea behind a language server is to encapsulate knowledge of a programming language inside a server that can communicate with development tools, such as IDEs, over a protocol that enables inter-process communication. The idea behind the Language Server Protocol is to standardize the protocol for how tools and servers communicate, so that a single language server can be reused in multiple development tools, and tools can support languages with minimal effort [5]. This reduces the work required to support  $n$  languages in  $m$  tools (IDEs) to  $O(n+m)$ .

A language server runs as a separate process and development tools communicate with the server using the language protocol over JSON-RPC. An example for how a tool and a language server communicate during a routine editing session is displayed on Fig. 1.



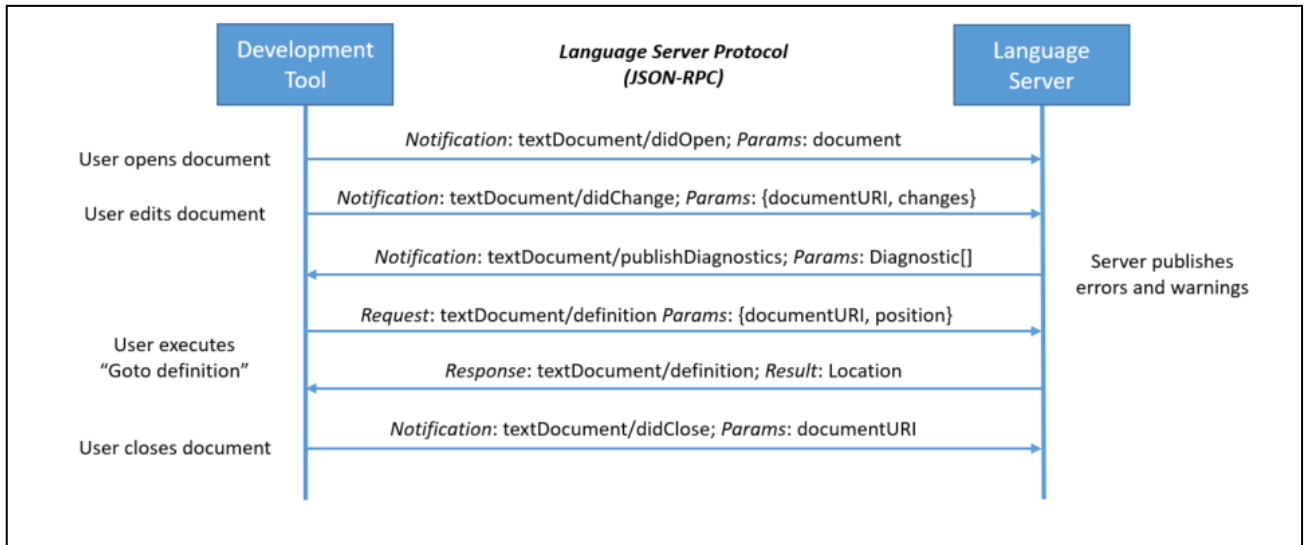


Figure 1. Example of LSP client-server communication [5]

#### IV. OVERVIEW OF THE DUCHAIN FRAMEWORK

“Duchain” is the name of a long-standing language support framework of the KDevelop IDE. The name of the framework is derived from a data structure that represents a source code file. The Duchain documentation [6] describes the framework in detail and is heavily quoted in the next four paragraphs.

The Definition-Use Chain (abbreviated as duchain) is a sequence of contexts in a source code file, and the associated definitions which occur in those contexts. A simplified way of thinking about it is that for each set of brackets (curly `{}` or not `()`), there is a separate context. Each context is represented by an object of the type `KDevelop::DUContext`. Each context has a single parent context (except for the top-level contexts, which have none), and any number of child contexts (including none). Additionally, each context can import any number of other contexts. Thus, the `KDevelop::DUContext` structure resembles a directed acyclic graph.

These `DUContext` objects are created during the first pass after parsing the code to an abstract syntax tree (AST). Also, at this stage the data types are parsed, and any declarations, which are encountered, are recorded against the context in which they are encountered in. Each declaration is represented by a `KDevelop::Declaration` object.

Creating a definition-use chain for a programming language requires implementing the following:

- a parser for the language,
- a context builder,
- a type builder,
- a declaration builder,
- a use builder.

Code completion support requires further work specific to the programming language.

Numerous duchain-based plugins have been implemented to let KDevelop support different programming languages. Unfortunately, most of these plugins have never been completed. Even some completed plugins are not regularly maintained and eventually stop working in latest KDevelop version.

KDevelop is primarily a C++ IDE, so its C++ language support plugin traditionally benefits from abundant developer attention. After all, KDevelop is written in C++, and its code is usually developed in KDevelop itself. The first such plugin had supported C++ language features heuristically. Since 2011, a new C++ language standard is published every three years. The rapid language evolution makes supporting all the new features heuristically a maintenance nightmare. Because of that, a new plugin was developed based on `libclang`. `libclang` is the C Interface to one of the few major C++ compilers – Clang. Eventually, the old heuristic plugin was removed as rarely used and no longer maintained.

#### V. INTEGRATING THE LANGUAGE SERVER PROTOCOL INTO KDEVELOP

Both C++ plugins and all other KDevelop language plugins are based on the Duchain framework. Once built, a definition-use chain can be examined and navigated using a synchronous API (without callbacks). Numerous high-level IDE features, such as code completion, semantic code highlighting, context browsing, identifier details and documentation, quick open, are implemented in terms of the long-lived duchain API and depend heavily on its synchronous nature.

A definition-use chain is built from an abstract syntax tree and contains a sequence of contexts that represent regions of code. An LSP client cannot possibly create a duchain, because the LSP API is much higher-level than that. The closest that an LSP server reply can offer is a list of symbols (the Document Symbols Request), that is, a list of variables, types, functions, numbers, etc. [7]

An LSP server resides in a separate process, so an LSP client cannot implement a synchronous API

required by high-level KDevelop features efficiently. A new asynchronous API has to be designed to properly integrate the LSP into KDevelop. The high-level IDE features must be ported to the asynchronous API. And the asynchronous API must be implemented using the existing synchronous duchain API to keep existing language plugins working. Finally, a new plugin that implements the asynchronous API using the LSP can be developed.

Such a proper integration of the LSP would vastly decrease the effort required to add new language support to KDevelop and maintain it over the long term. The LSP language support would likely be more complete compared to rarely maintained duchain-based plugins.

The LSP is not perfect or complete, but evolves over time. Integrating the LSP into yet another feature-rich IDE is bound to reveal functionality gaps or defects in existing features of the protocol. This can lead to improvements of the LSP standard and benefit all IDEs that use it.

### VI. POSSIBLE REUSE OF EXISTING LANGUAGE SUPPORT INTERFACES AND IMPLEMENTATIONS

The implementation of KDevelop is based on the Qt application development framework and on the KDE Frameworks (a set of Qt add-on libraries). In particular, many of KDevelop's syntax highlighting and text editing features are implemented by the `KSyntaxHighlighting` and `KTextEditor` KDE frameworks. A free/libre, cross-platform text editor application Kate is also based on these two frameworks and is maintained by the frameworks' developers themselves. An LSP client plugin for Kate was first released in 2019 and keeps evolving [8]. However, programming language support is a central feature of an IDE but only an optional add-on feature of a text editor. Therefore, the LSP should be integrated much more tightly in KDevelop than in Kate. Still, Kate's LSP client plugin can be used as a solid starting point of the future LSP plugin for KDevelop, because the two code bases are closely related.

Qt Creator is another free/libre, cross-platform, primarily C++ IDE. It is implemented using the same application development framework as KDevelop – Qt, though it does not depend on the KDE frameworks. Therefore, analyzing Qt Creator's approaches can offer insights into language support API redesign for KDevelop; parts of Qt Creator's LSP client implementation can potentially be reused.

Qt Creator had traditionally supported C++ language features heuristically, similarly to how KDevelop was doing it before the `libclang`-based plugin. Then a `clangd` Qt Creator plugin arrived. `Clangd` is a C++ language server based on the Clang C++ compiler. `Clangd`'s C++ language support is much more complete than that of the heuristic parser. But Qt Creator still offers an option to disable the `clangd` plugin and use the old parser instead, because it uses much less random access memory (RAM). Thus Qt Creator supports two very different C++ language support backends. We aim to achieve a similar result in KDevelop for C++ and other languages: support both the duchain and the LSP backends. Qt

Creator also offers specialized support for Python, QML, and Java language servers, which proves that its language support interfaces are not limited to C++.

An example of a language support interface specific to C++ is Qt Creator's `CppEditor::ModelManagerSupport` abstract class, which offers API such as `void followSymbol(const CursorInEditor &data, const Utils::LinkHandler &processLinkCallback, FollowSymbolMode mode, bool resolveTarget, bool inNextSplit)` and `void findUsages(const CursorInEditor &data) const`. The interface is inherited by two classes `BuiltinModelManagerSupport` (heuristic) and `ClangModelManagerSupport` (`clangd`). The interface is necessarily asynchronous, because the `clangd` language server lives in a separate process. Therefore, the API member functions return `void`, and `std::function` callbacks are used to allow asynchronous implementations reply to requests in their own time.

### VII. OTHER BENEFITS OF ASYNCHRONOUS LANGUAGE SUPPORT API

Besides enabling the LSP integration, asynchronous language support API also helps to address other long-standing IDE problems. Two such problems that affect KDevelop are described below.

A synchronous call to a language-support library's (e.g. `libclang`'s) function or to a higher-level IDE function can take a long time and freeze the user interface (UI) for seconds. This annoys, distracts, and demotivates software engineers that use the IDE. Asynchronous API allows improving UI responsiveness by performing the most time-consuming work in separate threads or even separate processes, and leaving the main UI thread free to handle user interactions.

Bugs in language-support libraries can make them crash. When core, language support, and UI code of an IDE resides in a single common process, such a crash brings down the entire IDE. Fixing bugs like this in huge language-support libraries, such as `libclang`, can be very time-consuming, especially for IDE developers who are not well-versed in the implementation details of the libraries. When language support code, including an external library, resides in a separate process, only that process alone crashes. Then the main IDE process can restart the language-support process, and the user would experience only the minor inconvenience of temporary interruption of language-related updates, or possibly not even notice the crash at all. Asynchronous API is the necessary first step in moving language support code into a separate process.

### ACKNOWLEDGMENT

Special thanks to KDevelop developers Milian Wolff and Sven Brauch for ideas about how to properly integrate the LSP into KDevelop.

### REFERENCES

- [1] D. Bork and P. Langer, "Catchword: Language Server Protocol: an introduction to the protocol, its use, and adoption for web modeling tools," *Enterprise Modelling and Information Systems Architectures*, vol. 18, no. 9, pp. 1–16, 2023.

## Modeling, control and information technologies – 2024

- [2] S. Marr, H. Burchell, and F. Niephaus, “Execution vs. parse-based language servers: tradeoffs and opportunities for language-agnostic tooling for dynamic languages,” in Proceedings of the 18th ACM SIGPLAN International Symposium on Dynamic Languages (DLS '22), December 07, 2022, Auckland, New Zealand, pp. 1-14.
- [3] D. Barros, S. Peldszus, W. K. G. Assunção, and T. Berger, “Editing support for software languages: implementation practices in language server protocols,” in ACM/IEEE 25th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS '22), October 23–28, 2022, Montreal, QC, Canada. ACM, New York, NY, USA, 12 pages.
- [4] N. Mitchell, M. Kiefer, P. Iborra, et al., “Building an integrated development environment (IDE) on top of a build system: the tale of a Haskell IDE,” conference: IFL 2020: 32nd Symposium on Implementation and Application of Functional Languages.
- [5] The LSP overview. URL: <https://microsoft.github.io/language-server-protocol/overviews/lsp/overview/>
- [6] The Duchain framework documentation. URL: <https://commits.kde.org/kdevelop?path=kdevplatform/language/duchain/Mainpage.dox>
- [7] The LSP specification. URL: <https://microsoft.github.io/language-server-protocol/specifications/lsp/3.17/specification/>
- [8] The LSP Client Plugin for Kate documentation. URL: <https://docs.kde.org/stable5/en/kate/kate/kate-application-plugin-lspclient.html>

# Автоматизоване тестування сайту факультету з використанням Cypress

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.039>

Ольга Дутчак  
Чернівецький національний університет імені Юрія  
Федьковича  
Чернівці, Україна  
[dutchak.olha.o@chnu.edu.ua](mailto:dutchak.olha.o@chnu.edu.ua)

Інесса Краснокутська  
Чернівецький національний університет імені Юрія  
Федьковича  
Чернівці, Україна  
[i.krasnokutska@chnu.edu.ua](mailto:i.krasnokutska@chnu.edu.ua)

Ольга Мартинюк  
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
Чернівці, Україна  
[o.martynyuk@chnu.edu.ua](mailto:o.martynyuk@chnu.edu.ua)

**Abstract** – У даній роботі досліджено важливість та ефективність тестування веб-сайту факультету математики та інформатики за допомогою наскрізних тестів та їх реалізація з використанням фреймворку Cypress. Це дозволило підняти стандарти якості та функціональності веб-ресурсу, забезпечуючи надійний користувацький досвід та ефективне виявлення та усунення потенційних проблем.

**Keywords** – веб-розробка; e2e тести; Cypress.io; автоматизоване тестування; UI/UX design.

## I. Вступ

Швидкий розвиток технологій став невід’ємною частиною сучасного світу, особливо у сфері веб-розробки. Інтернет, який раніше був лише інформаційним ресурсом, перетворився на потужну платформу для спілкування, бізнесу та навчання. У такому цифровому середовищі проблема функціональності та ефективності веб-ресурсів вищих навчальних закладів набуває дедалі більшої актуальності.

У цьому контексті необхідно проводити систематичне тестування для забезпечення якості сайту факультету математики та інформатики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (<https://fmi.chnu.edu.ua/>) для гарантування зручного доступу до інформації для студентів, викладачів та всіх зацікавлених осіб, а також для підтримки репутації факультету у віртуальному просторі.

Веб-сайт факультету має широкий спектр функціональних можливостей, серед яких можна виділити доступ до розкладу занять, матеріалів, контактної інформації викладачів та керівництва, а також можливість взаємодії через електронну пошту та онлайн-платформи. Однак, у процесі взаємодії з веб-сайтом можуть виникати потенційні проблеми, такі як повільне завантаження сторінок, неочікувані помилки під час завантаження файлів або незручність у навігації по сайту.

У зв’язку з цим, наскрізне E2E тестування стає важливим етапом у забезпеченні стабільної роботи.

Метою роботи було проведення тестування для забезпечення правильного функціонування всього ресурсу, щоб гарантувати користувачам можливість швидко і легко знаходити потрібну інформацію.

## II. Огляд інструменту Cypress та E2E тестування

Cypress — це відносно нова платформа наскрізного тестування з відкритим кодом, розроблена для веб-додатків, яка використовує мову JavaScript. Працює на Windows, Linux і macOS.

Цей фреймворк став практичним і зручним інструментом для тестування завдяки простоті використання та можливості автоматичної перевірки в реальному часі. Інтуїтивний інтерфейс та висока швидкість виконання тестів роблять Cypress відмінним вибором для автоматизації, полегшуючи процес виявлення і виправлення проблем на веб-сайті.

Тести E2E — це техніка тестування програмного забезпечення, яка перевіряє функціональність і продуктивність усієї програми від початку до кінця шляхом імітації реальних сценаріїв користувача [1].

Основна перевага такого тестування полягає в тому, що воно дозволяє переконатися, що всі компоненти програми працюють разом і забезпечують правильний користувацький досвід.

## III. Структура тестового проекту

У папку E2E було додано дві папки: tests для зберігання файлів тестів та pages для зберігання локаторів елементів і дій з ними (Рис.1). Це реалізує популярну техніку “Page Object Model” [2], яка є дизайн-патерном. Такий підхід спрощує доступ до елементів HTML сторінки, оскільки надалі достатньо імпортувати об’єктну модель сторінки в тестовий сценарій.

e2e	94
pages	95
JS aboutUs.page.js	96
JS activity.page.js	97
JS applicant.page.js	98
JS home.page.js	99
JS news.page.js	100
JS student.page.js	101
tests	103
JS aboutUs.cy.js	104
JS activity.cy.js	105
JS applicant.cy.js	106
JS home.cy.js	107
JS news.cy.js	108
JS student.cy.js	109

Рисунок 1: Демонстрація реалізації техніки Page Object Model

Структура тестових сценаріїв організована наступним чином: на початку вказується назва тестового сценарію в *describe*, що визначає загальний контекст. Далі слідує секція *beforeEach*, яка використовується для підготовки початкових умов перед виконанням кожного тесту. Потім визначаються контексти *context*, що групують пов'язані тести, де кожен тест описується за допомогою конструкції *it*. Таке оформлення тестових сценаріїв забезпечує логічність структури та підвищує читабельність [3].

#### IV. АНАЛІЗ НАПИСАНИХ ТЕСТІВ

Основною метою розробки E2E тестів було забезпечення всебічного покриття сайту факультету наскрізними тестами із використанням Cypress як інструмента автоматизованого тестування. У ході тестування було успішно проведено низку позитивних і негативних сценаріїв, що підтвердили коректність функціонування ключових елементів сайту. Тести дозволяють вчасно виявити можливі недоліки, які потенційно можуть негативно вплинути на користувацький досвід.

E2E тести дають можливість підсвітити деякі моменти, які можуть завадити користувачам, і аналізуючи результат виконання автоматизованих тестів можна надати пропозиції щодо усунення потенційних дефектів. Проте слід зазначити, що усунення одних недоліків може призвести до появи інших або повторного виникнення тих, над якими вже велась робота із виправлення. Це підкреслює важливість регулярного тестування для надійності сайту та його постійного вдосконалення. А застосування автоматизованих тестів дозволяє скоротити використання людських ресурсів як у випадку мануального тестування.

Серед написаних тестів як приклад можна навести тест функції пошуку, під час якого

перевірялася валідність результатів. Спочатку вводився пошуковий запит, після чого, якщо елемент знайдено, отримувалась кількість сторінок, і здійснювалась перевірка результатів на відповідність пошуковому слову.

Такий підхід дозволяє не лише впевнитися в наявності результатів, але й перевірити їх відповідність контексту, що підвищує надійність тестування.

З усіма іншими тестами для сайту факультету математики та інформатики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича можна ознайомитись за посиланням:

<https://github.com/olhadutchak/fmitestscypress>.

#### ВИСНОВКИ

Було проведено повне тестування сайту факультету математики та інформатики, що стало важливим етапом у процесі покращення його функціональності. Під час тестування вдалося переконатися в правильній і надійній роботі сайту. Наявність автоматизованих тестів дозволяє без участі людини постійно проводити тестування для виявлення потенційних проблем. Це є позитивним аспектом, адже знаючи проблему її можна виправити, що дозволяє підтримувати загальну зручність сайту та забезпечує кращий досвід для користувачів.

Тестування також включало перевірку загальної зручності та доступності інтерфейсу, що підтвердило відповідність сайту сучасним вимогам UI/UX дизайну.

Завдяки використанню E2E тестування через фреймворк Cypress вдалося автоматизувати процес та точно відтворити дії користувачів.

Загалом автоматизоване тестування допомогло підвищити якість та зручність сайту факультету, оскільки валідація та верифікація це основа забезпечення якості програмного продукту.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Maurizio Leotta, Diego Clerissi, Filippo Ricca, and Paolo Tonella. 2016. "Approaches and Tools for Automated End-to-End Web Testing", *Advances in Computers* 101 (2016), 193–237.
- [2] I. V. Krasnokutska and O. S. Krasnokutskyi, "Implementing E2E tests with Cypress and Page Object Model: evolution of approaches", *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 3662, pp. 101–110, 2024. [Online]. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-3662/paper24.pdf>
- [3] "Cypress Documentation" Cypress.io. Available: <https://docs.cypress.io/>



# Особливості архітектури Amazon EC2 для масштабування обчислювальних ресурсів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.040>

Богдан Красько

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[b.v.krasko@nuwm.edu.ua](mailto:b.v.krasko@nuwm.edu.ua)

Петро Грицюк

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[p.m.hrytsiuk@nuwm.edu.ua](mailto:p.m.hrytsiuk@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – Особливості архітектури Amazon EC2 для масштабування обчислювальних ресурсів відображають ключові можливості та стратегії, які дозволяють динамічно керувати ресурсами для забезпечення продуктивності та ефективності хмарних сервісів. Amazon Elastic Compute Cloud дозволяє створювати масштабовані віртуальні сервери, які можна налаштувати відповідно до потреб користувачів за допомогою таких функцій, як автоматичне масштабування, підтримка різних типів екземплярів, поєднання з іншими службами AWS, S3, RDS, Lambda, а також використання контейнеризації та еластичного балансування навантаження. Як наслідок, потужності мінімізують витрати на інфраструктуру, забезпечують відновлення після збоїв та автоматично масштабують додатки залежно від навантаження.

**Ключові слова** – AWS; EC2; Autoscaling

## I. ВСТУП

Amazon EC2 є одним із ключових сервісів AWS, які надають масштабовані хмарні обчислювальні ресурси [1]. Архітектурні особливості Amazon EC2 роблять його чудовим рішенням для динамічних обчислювальних вимог, які можуть швидко змінюватися залежно від бізнес-вимог. Автоматично збільшуючи та зменшуючи кількість віртуальних серверів або екземплярів, EC2 забезпечує оптимальне використання ресурсів. Ключовими аспектами масштабованої архітектури EC2 є її еластичність, її: автоматизація у формі керування екземплярами EC2 за допомогою автоматичного масштабування, інтеграція з іншими службами AWS і широкий спектр типів екземплярів для різних обчислювальних потреб. Автоматичне масштабування може допомогти встановити правила для автоматичного додавання та видалення екземплярів на основі навантаження, що забезпечує покращену продуктивність і щільність ресурсів [4]. Крім того, EC2 дає можливість використовувати різні патерни, такі як розподілені системи, кластеризація та безсерверні рішення через AWS Lambda, що робить його дуже гнучким для імплементації малих і великих масштабованих варіацій [3]. Amazon EC2 також підтримує високий рівень доступності через можливість розгортання екземплярів у кількох зонах доступності та регіонах.

Це дозволяє забезпечити стійкість до збоїв і високу надійність хмарної інфраструктури для критично важливих додатків [2].

## II. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2) — це хмарна служба, яка надає масштабовані обчислювальні потужності в хмарі AWS [5]. Основною перевагою цієї платформи є гнучкість і можливість динамічного масштабування обчислювальних ресурсів в залежності від потреб користувачів [6].

Amazon EC2 (Elastic Compute Cloud) надає можливість автоматично збільшувати або зменшувати кількість обчислювальних ресурсів у відповідь на зміну навантаження. Це досягається за допомогою механізму Auto Scaling, який дозволяє додавати нові екземпляри (інстанси) або вимикати їх залежно від налаштувань і політик.

Auto Scaling групи дозволяють визначити мінімальну, максимальну та бажану кількість інстансів. Наприклад, встановивши мінімум у 2 інстанси, максимум у 10, і бажану кількість у 5. Auto Scaling автоматично забезпечить, щоб кількість інстансів відповідала цим параметрам [4].

### Основні функції Auto Scaling включають

- Автоматичний моніторинг стану інстансів і заміна несправних для підтримки бажаної кількості [6].
- Розподіл інстансів між різними зонами доступності для забезпечення високої доступності та стійкості.
- Використання різних типів інстансів і варіантів покупки (Spot, On-Demand) для зниження витрат [5].

Amazon EC2 (Elastic Compute Cloud) пропонує широкий вибір типів інстансів, кожен з яких оптимізований для певних завдань. Це дозволяє користувачам обирати найбільш підходящий набір ресурсів для своїх потреб, що значно підвищує ефективність та гнучкість масштабування [1].

### Основні типи інстансів

- Загального призначення - інстанси забезпечують баланс між обчислювальними потужностями, пам'яттю та мережею. Вони підходять для різноманітних навантажень, таких як веб-сервери та сховища коду.
- Оптимізовані для обчислень - інстанси мають високу обчислювальну потужність і підходять для завдань, що потребують інтенсивних обчислень, таких як наукові моделювання та обробка великих даних.
- Оптимізовані для пам'яті - інстанси мають велику кількість оперативної пам'яті і підходять для баз даних та інших додатків, що потребують багато пам'яті.
- Оптимізовані для зберігання - інстанси забезпечують високу пропускну здатність для зберігання даних і підходять для завдань, що потребують інтенсивного доступу до дискових ресурсів, таких як обробка великих даних та сховища [3].
- Прискорені обчислення - інстанси використовують графічні процесори (GPU) або інші апаратні прискорювачі для завдань, що потребують високої обчислювальної потужності, таких як машинне навчання та обробка відео [6].

Завдяки такому різноманіттю типів інстансів, користувачі можуть обирати найбільш оптимальні ресурси для своїх конкретних завдань, що дозволяє ефективно масштабувати свої додатки та сервіси.

Amazon EC2 (Elastic Compute Cloud) є потужним інструментом для розгортання та управління обчислювальними ресурсами в хмарі. Він інтегрований з іншими сервісами AWS, такими як Amazon Elastic Block Store (EBS) та Amazon S3, що дозволяє масштабувати як обчислювальні ресурси, так і системи зберігання даних без переривання роботи додатків.

Amazon EBS забезпечує стійке блокове зберігання для використання з EC2, що дозволяє зберігати дані на довготривалій основі та забезпечує високу продуктивність для критично важливих робочих навантажень. Це особливо корисно для баз даних, файлових систем та інших додатків, які потребують постійного доступу до даних.

Amazon S3 (Simple Storage Service) надає масштабоване об'єктне зберігання, яке ідеально підходить для зберігання та захисту великих обсягів даних. Завдяки інтеграції з EC2, користувачі можуть легко зберігати резервні копії, архіви та інші важливі дані, забезпечуючи їх доступність та безпеку [1].

Автоматизоване розподілення трафіку між декількома інстансами EC2 за допомогою Elastic Load Balancer (ELB) забезпечує рівномірне завантаження ресурсів, підвищуючи ефективність використання серверів. Це дозволяє уникнути перевантажень окремих інстансів, що може

привести до зниження продуктивності або навіть до відмови додатків.

ELB автоматично розподіляє вхідний трафік між доступними інстансами, враховуючи їх поточне завантаження та стан. Це забезпечує високу доступність додатків, оскільки у разі виходу з ладу одного з інстансів, трафік буде перенаправлено на інші, що залишилися в робочому стані. Крім того, ELB підтримує масштабування додатків, дозволяючи додавати або видаляти інстанси в залежності від поточних потреб, що забезпечує гнучкість і адаптивність системи.

Користувачі можуть масштабувати ресурси, зберігаючи високий рівень безпеки за допомогою різноманітних механізмів контролю доступу. Одним із таких механізмів є Virtual Private Cloud (VPC), який дозволяє створювати ізольовані мережеві середовища в хмарі. Security Groups забезпечують контроль доступу на рівні екземплярів, дозволяючи визначати правила вхідного та вихідного трафіку. Network ACLs (Access Control Lists) додають додатковий рівень безпеки, контролюючи трафік на рівні підмереж. Крім того, шифрування даних гарантує, що інформація залишається захищеною як під час передачі, так і при зберіганні. Завдяки цим інструментам користувачі можуть ефективно керувати своїми ресурсами, не жертвуючи безпекою.

Amazon EC2 (Elastic Compute Cloud) працює в багатьох регіонах по всьому світу, кожен з яких складається з кількох зон доступності (Availability Zones, AZ). Це дозволяє масштабувати ресурси глобально, забезпечуючи високу відмовостійкість та низьку затримку для користувачів у будь-якому регіоні.

### III. ВИСНОВКИ

Таким чином, архітектура Amazon EC2 забезпечує ефективне масштабування обчислювальних ресурсів завдяки високій еластичності, різноманітності інстансів, інтеграції з іншими сервісами AWS, балансуванню навантаження та глобальній доступності.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Amazon Web Services (AWS). Amazon Elastic Compute Cloud (EC2) Documentation. <https://docs.aws.amazon.com/ec2/>.
- [2] Jassy, A. (2017). *The Cloud Computing Revolution: The AWS Story*. New York: AWS Publishing.
- [3] Barroso, L. A., & Hölzle, U. (2009). *The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines*. *Synthesis Lectures on Computer Architecture*, 4(1), 1-108.
- [4] Kratzke, N., & Quint, P.-C. (2017). *Understanding Cloud-native Applications after 10 Years of Cloud Computing – A Systematic Mapping Study*. *Journal of Systems and Software*, 126, 1-16.
- [5] Duan, J., Faker, P., Fesak, A., & Stuart, T. (2012). *Benefits and Drawbacks of Cloud-Based vs Traditional ERP Systems*. *Proceedings of the 2012-13 Course on Advanced Cloud Computing*, 1-10.
- [6] Villamizar, M., et al. (2015). *Evaluating the Impact of Auto-scaling Mechanisms on the Performance of Web Applications in the Cloud*. *International Journal of Cloud Computing*, 7(2), 116-124.

# Дотримання RMS інструментами вимог якості SRS та дизайн комплементарної системи

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.041>

Роман Крук

Національний університет водного господарства та природокористування, НУВГП  
Рівне, Україна  
[r.a.kruk@nuwm.edu.ua](mailto:r.a.kruk@nuwm.edu.ua)

Наталія Жуковська

Національний університет водного господарства та природокористування, НУВГП  
Рівне, Україна  
[n.a.zhukovska@nuwm.edu.ua](mailto:n.a.zhukovska@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – У цій роботі досліджуються виклики інженерії вимог до програмного забезпечення в Agile-проектах. Розглянуто проблеми, пов'язані з неповними, неконсистентними та неструктурованими вимогами, і підкреслено, як ітеративна природа Agile ускладнює управління вимогами. Дослідження порівнює широко використовувані інструменти, такі як Jira та Confluence, в управлінні вимогами до програмного забезпечення, виявляючи прогалини в їх здатності відповідати ключовим атрибутам якості. У роботі також представлено концептуальну модель для покращення управління вимогами завдяки динамічній системі моделювання SRS.

**Ключові слова** – Agile; інженерія вимог; вимоги до ПЗ; атрибути якості SRS; специфікація до ПЗ; системний аналіз; міждисциплінарний підхід.

## I. ВСТУП

Гнучка методологія розробки ПЗ, хоч і найефективніша у реаліях сучасного мінливого ринку, створює також унікальні виклики у сфері інженерії вимог до ПЗ та управління ними[1]. Порівняльне дослідження українського IT-сектора викрило наступні основні проблеми управління вимогами до ПЗ в Agile-проектах:

1. Пропущені або неповні вимоги до ПЗ;
2. Неконсистентність вимог до ПЗ;
3. Брак простежуваності вимог до ПЗ та можливостей виявлення залежностей між ними;
4. Низький рівень структурованості вимог до ПЗ та вичерпності специфікації до продукту;

Усі з вище перелічених викликів спричинені особливостями методології Agile, а саме - ітеративного підходу до опрацювання вимог до ПЗ. У класичних методологіях розробки, зокрема водоспадній моделі, специфікація вимог для ПЗ формується вичерпною ще до початку будь-яких інженерних робіт [2], таким чином уникаючи вище перелічених викликів, а втім така модель є маложиттєздатною на сучасному ринку [3][4], за винятком проектів, що вимагають виключної завершеності (наприклад, ПЗ для будівництва, транспорту, медицини тощо) [5].

Дане дослідження ґрунтується на спробі авторів поглянути на інженерію вимог і, відповідно, проблеми, які наявні в цій сфері, як на процес повністю самостійний та відокремлений від загального “управління вимогами”, “управління IT-проектом” чи “дизайну системи”. Відповідно, з цієї точки зору етап інженерії вимог потребує окремої повноцінної прикладної системи для підтримання високого рівня якості вимог до ПЗ протягом усього життєвого циклу IT-проекту, схожого до того, який існує на рівні загального “управління проектом” (веб-платформи Atlassian Jira та Confluence), а також для “управління програмним кодом” на прикладі CI/CD та технології Git.

Таким чином, мета даного дослідження полягала в аналізі актуальності та важливості атрибутів якості вимог до ПЗ, а також ступеня відповідності поточних інструментів управління вимогами, поширених у проектах гнучкої методології розробки з рекомендованими атрибутами якості вимог для виявлення слабких місць. Для цього був проведений:

1. Аналіз професійної та наукової літератури для агрегації знань щодо рекомендованих атрибутів якості вимог до ПЗ;

2. Аналіз Atlassian Jira та Confluence як поширених в Agile-проектах інструментів управління вимогами та огляд їх основних функцій та принципу роботи;

3. Аналіз відповідності атрибутів якості вимог до ПЗ з функціями інструментів управління вимогами до ПЗ;

Формування висновків та подальших кроків дослідження.

## II. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Для аналізу літератури використовувався метод систематичного огляду літератури (СОЛ), який дозволяє досліджувати, оцінювати та підсумовувати попередні дослідження. Цей метод включає три етапи: планування, аналіз та звіт. На етапі планування було розроблено дослідницькі питання, що стосувалися якості вимог до ПЗ, зокрема критеріїв якості для специфікації вимог у контексті

Agile-проектів. Процес пошуку літератури відбувався через академічні бази даних, такі як Google Scholar, IEEE Explore, ACM Digital Library та інші. Було визначено критерії включення і виключення публікацій, зокрема відокремлено роботи, що стосуються якості вимог, але не якості самого ПЗ. Публікації, що не відповідали цим критеріям, були відсіяні, і було відібрано 261 первинне дослідження, з яких 16 відповідали темі дослідження.

Однією з основних проблем, виявлених у літературі, є складнощі з визначенням повних і узгоджених вимог до ПЗ. Часто клієнти не можуть точно сформулювати всі вимоги на початкових етапах проекту, що призводить до виникнення проблем із відстеженням вимог і повторною розробкою. Для вирішення цих проблем необхідні додаткові дослідження. Аналіз також охоплює методи перевірки якості вимог, більшість з яких належать до знання-орієнтованих підходів. Однак інструменти для перевірки вимог часто обмежені, і багато з них залежать від специфіки домену. Виникають труднощі з вираженням вимог і отриманням зворотного зв'язку від клієнтів, що ускладнює практичне застосування цих методів. У результаті проведеного огляду було виявлено 20 атрибутів якості вимог до ПЗ та 11 атрибутів специфікації. Атрибути були систематизовані та ранжовані на основі поширеності в літературі. Зібраний матеріал дозволив виявити прогалини у дослідженнях та сфокусувати подальші дослідження на вирішенні цих проблем.

### III. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІНСТРУМЕНТІВ УПРАВЛІННЯ ВИМОГАМИ В AGILE

Під час проведеного аналізу публікацій та фахових посібників було визначено основні категорії атрибутів якості, встановлено їхні визначення та поширеність. На основі проведеного аналізу було визначено одностайність або сумнівність кожного із наведених атрибутів якості.

Було визначено, що основними затребуваними атрибутами якості специфікації вимог до ПЗ є структурованість, завершеність. Узгодженість, простежуваність, змінюваність, верифікабельність та ненадмірність (Рис. 1).

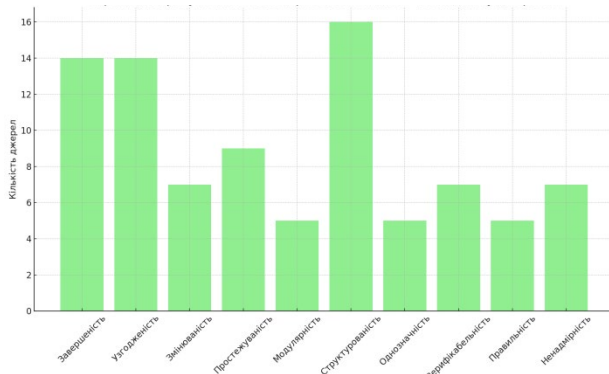


Рисунок 1. Атрибути якості специфікації вимог до ПЗ згідно зі згадками в проаналізованій літературі

Наступний етапом дослідження був порівняльний аналіз найпоширеніших Agile-

інструментів для управління вимогами. Agile-інструмент - це будь-яка інформаційна система, що поширено використовується в IT Agile-проекті для роботи з певною частиною проектною інформації, що містить вимоги до ПЗ.

Більшість інструментів управління вимогами належать до одного з двох зазначених типів: Issue Tracking Software (далі - ITS) або ж Wiki-Software (далі - WS). Таким чином, методом зворотньої інженерії можна висувати, що ці дві категорії інформаційних систем, що так поширено використовуються в Agile-проектах, задовольняють дві базові потреби:

1. ITS дозволяють керувати мінливим та ітеративним процесом розробки ПЗ, зосереджуючись перш за все не на вимогах, а на завданнях, що повинні бути виконані. Такі завдання не обов'язково корелюються з вимогами нового чи вдосконаленого функціоналу;
2. WS, на противагу, виконують роль сховища проектною специфікації в цілому, та специфікації вимог до ПЗ зокрема.

Втім саме ITS є основними у використанні в Agile-проектах, тимчасом як WS виконують лише допоміжну роль. З іншого боку, саме WS за належного користування ними, могли б забезпечити вирішення викликів, перелічених у Вступі даної роботи. Ручна синхронізація вимог в ITS та специфікації в WS є часозатратною і такою, що не дає переваг у близькій перспективі. Стратегічною ж перспективою часто нехтують. Разом з тим, наразі відсутнє рішення, що забезпечувало б синхронізацію між вимогами до ПЗ з ITS та WS системи, в силу складнощів їх неструктурованої природи. Для подальших пошуків, було проаналізовано, як такі два типи системи працюють зі своїми вимогами.

ITS мають кілька спільних ключових функцій, які спрощують процес виявлення, реєстрації та керування завданнями в рамках проекту. ITS дозволяють користувачам систематично повідомляти про проблеми чи помилки, надаючи атрибути для детального опису, рівнів серйозності, пріоритету та вкладень, класифікувати проблеми, сортувати та фільтрувати за різними критеріями [6; 7]. ITS підтримують конфігуративні робочі процеси, які зображають життєвий цикл проблеми, від створення до вирішення. ITS полегшують спілкування між членами команди розробки за допомогою вбудованих систем комунікації. ITS інтегруються з іншими інструментами розробки та управління проектами, такими як системи контролю версій Git, конвеєри безперервної інтеграції/безперервного розгортання (CI/CD) і програмним забезпечення для управління проектами. ITS забезпечують можливості звітності та аналітики, такими як час вирішення завдання, розподіл робочого навантаження та тенденції виникнення проблем. ITS включають контроль доступу на основі ролей, щоб гарантувати доступ до даних лише авторизованого персоналу. ITS ефективні для відстеження завдання і керування їх







орієнтуються на обробку натуральних мов, оскільки фокус на обробку даних поза обсягом робіт даного моделювання.

Проектування включало міждисциплінарний підхід, а саме поєднання системного аналізу та комп'ютерних наук. Було розроблено модель використання системи (див. Рис. 3), а також високорівнева модель розгортання системи (Рис. 4)



Рисунок 3. Діаграма варіантів використання динамічної системи моделювання SRS

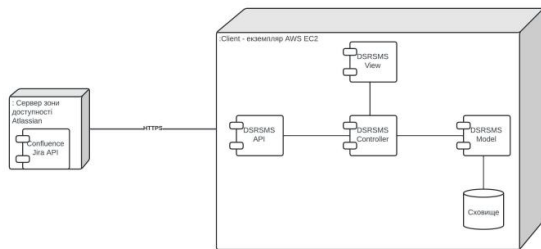


Рисунок 4. Високорівнева діаграма розгортання динамічної системи моделювання SRS

### V. ВИСНОВКИ

У цій частині роботи підсумовуються результати проведеного дослідження та аналізу, а також окреслюються подальші питання та кроки дослідження. Метою першого етапу даної роботи було провести огляд літератури та публікацій на предмет атрибутів якості вимог до ПЗ. На другому етапі дослідження був проведений огляд двох основних типів систем, які використовуються на управління вимогами: Issue Tracking Software та Wiki-software. Аналіз показав, що функціоналу обох типів застосунків притаманна деревовидна структура даних у контексті вертикальної ієрархії вимог, і звичайного напрямленого розрідженого графу з циклами - для горизонтальних зв'язків. Дана властивість відповідає вимогам до структурованості та модулярності SRS. Втім, всі вище перелічені якості стосуються сутностей-носіїв вимог. Вони не у повній мірі поширюються на самі вимоги до ПЗ. Такі ж якості вимог, як атомарність, змінюваність не мають функціоналу на їх задовільну підтримку, що впливає на кінцеву якість специфікації.

Перевагою даного дослідження є порівняльний аналіз функціоналу поширених систем управління

вимогами на наявність інструментів для задоволення атрибутів якості вимог до ПЗ та проектування моделі системи, яка б була здатна виправити наявні недоліки. Недоліком даного дослідження є, безумовно, вузька вибірка систем для аналізу, що обмежується поширеними в Agile-проектах України Atlassian Jira та Confluence.

Таким чином, подальшими кроками в дослідженні буде розробка системи управління вимогами до ПЗ, котра відповідатиме всім атрибутам якості вимог до ПЗ, описаним у даній роботі. На основі проведеного аналізу автори висуюють припущення, що за основу даної системи є доцільним використати вертикальну деревовидну структуру даних, притаманну системам Jira та Confluence, а також ввести додатковий параметр до графу, для забезпечення аудиту та версіонування кожного його вузла. Робочою моделлю такої системи стане тривимірний граф, вузлами якого будуть безпосередньо вимоги до ПЗ, а не їх сутності-носії. Також доцільним брати за основу простий орієнтований граф для позначення зв'язків між вимогами, аби забезпечити відстежуваність. Для модулярності планується використати мітки категоризації. Окремим питанням до подальшого дослідження є перетворення вимог до ПЗ з природної мови у структуровані або напівструктуровані дані.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Kruk, R., & Zhukovska, N. (2023). SURVEY STUDY OF REQUIREMENTS ENGINEERING ISSUES AND CHALLENGES IN AGILE PROJECTS. Вісник НУВГП. Технічні науки, 103(3), 195–212.
- [2] Adenowo, A., & Adenowo, B. A. (2020). Software Engineering Methodologies: A Review of the Waterfall Model and Object-Oriented Approach. International Journal of Scientific and Engineering Research, 7(4), 427–434.
- [3] Pargaonkar, S. (2023). A Comprehensive Research Analysis of Software Development Life Cycle (SDLC) Agile & Waterfall Model Advantages, Disadvantages, and Application Suitability in Software Quality Engineering. International Journal of Scientific and Research Publications, 13(8), 120–124.
- [4] Thesing, T., Feldmann, C., & Burchardt, M. (2021). Agile versus Waterfall Project Management: Decision Model for Selecting the Appropriate Approach to a Project. CENTERIS - International Conference on ENTERprise Information Systems, 746–756.
- [5] El-Sokkary, N., El-Masry, W. H., & Darwish, N. R. (2021). A Proposed Hybrid Approach for Developing Healthcare Information Systems. International Journal of Computer Applications, 183(28), 17–23. <https://doi.org/10.5120/ijca2021921664>
- [6] Jira Cloud resources | Jira Cloud | Atlassian Support. Atlassian Support. URL: <https://support.atlassian.com/jira-software-cloud/resources/> (date of access: 13.08.2024).
- [7] Trello Guides: Help Getting Started With Trello | Trello. Manage Your Team's Projects From Anywhere | Trello. URL: <https://trello.com/guide> (date of access: 13.08.2024).
- [8] Database schema. Atlassian Developer. URL: <https://developer.atlassian.com/server/jira/platform/database-schema/> (date of access: 13.08.2024).
- [9] Confluence Cloud resources | Confluence Cloud | Atlassian Support. Atlassian Support. URL: <https://support.atlassian.com/confluence-cloud/resources/> (date of access: 13.08.2024).
- [10] 18.IBA. (2015). A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge (BABOK Guide) Version 3.0. International Institute of Business Analysis.

# Java 23: нові можливості та вдосконалення

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.042>

Тарас Ляшук

Рівненський державний гуманітарний університет

Рівне, Україна

taras.liashuk@rshu.edu.ua

**Анотація** – Показано нововведення та удосконалення вже існуючих можливостей технології Java 23. Зокрема розглядаються такі компоненти як векторна графіка, багато поточність, управління пам'яттю та інші компоненти.

**Ключові слова** – Java; крос-платформність; віртуальна машина.

Вже не одне десятиліття, платформа Java являється однією із найпопулярніших технологій розробки програмного забезпечення [1] (рис.1). Завдяки своїй революційності у вигляді крос-платформності та великого переліку переваг (безпека, надійність, відмовостійкість, оборотна сумісність тощо) дана платформа знайшла широке застосування серед розробників програмного забезпечення. Як і будь-яка технологія, Java не стоїть на місці і йде в ногу з часом – інженери Oracle вдосконалюють її та випускають все нові та нові версії, кожна наступна з яких надає перелік додаткових можливостей розробки.

Приємно й те, що компанія Oracle підтримує нашу країну в її боротьбі за незалежність проти загарбницької та нацистської рф [2] (рис. 2).

На даний момент, найновішою версією являється Java 23, яка була представлена на конференції JavaOne 2023, вносячи значний прогрес у розвиток Java, продовжуючи традиції її еволюції та вдосконалення. Ця версія містить низку нових функціональних можливостей та поліпшень, спрямованих на підвищення продуктивності, зручності та безпеки розробки.

Rank	Programming Language	Market Share	Trend
1	Python	28.11%	+0.6%
2	Java	15.52%	-0.1%
3	JavaScript	8.57%	-0.1%
4	C/C++	6.92%	+0.1%
5	C#	6.73%	-0.1%

Рис. 1. Рейтинг мов програмування станом на 2024 за версією [www.orientosoftware.com](http://www.orientosoftware.com).

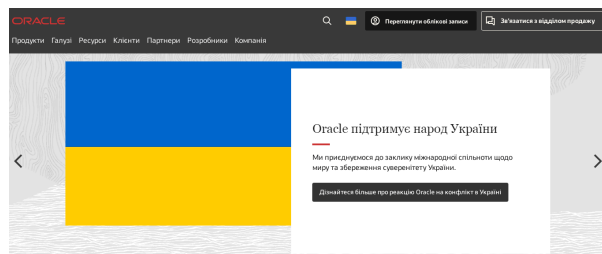


Рис. 2. Реакція Oracle на війну в Україні.

Розглянемо основні нововведення Java 23 [3], які варто знати кожному Java-розробникові:

1. **Нове API для Vector Graphics.** Однією з найбільш помітних змін у Java 23 є введення нового API для роботи з векторною графікою. Це дозволяє розробникам створювати графічні програми з високою продуктивністю, використовуючи нові векторні типи (напр. Vector2D та Vector3D). Завдяки таким типам, програмісти можуть легко реалізувати складні графічні трансформації та маніпуляції з графікою, що робить дану версію більш привабливою для розробників ігор і (2/3)D-застосунків.

2. **Зміни в Pattern Matching.** Java 23 покращує підтримку механізму «pattern matching» (узгодження патернів), що дозволяє розробникам з легкістю перевіряти типи об'єктів у структурі switch. Тепер підтримуються не лише примітиви, але й об'єктні типи, що забезпечує більшу гнучкість при обробці даних. Завдяки таким змінам, код стає більш читабельним і зручним для роботи.

3. **Використання Records з полями null.** Раніше, при створенні record-типів, полям не можна було призначити значення null без спеціальних конструкцій. Java 23 знімає це обмеження, дозволяючи полям record бути нульовими. Це дозволяє розробникам легше керувати станами об'єктів та робить records більш універсальними при моделюванні доменних об'єктів.

4. **Розширення підтримки Project Loom.** Project Loom, що постійно вдосконалюється, отримав нові можливості в Java 23. Це дозволяє розробникам використовувати легкі потоки (fibers) для написання асинхронного коду в більш звичному синхронному стилі, при цьому, спрощуюючи обробку конкурентності. Впроваджені нові API значно полегшують управління процесами вводу/виводу та покращують загальну продуктивність програм.

5. **Поліпшення в Project Panama.** Project Panama (зокрема Foreign Function & Memory API) продовжує спрощувати інтеграцію Java з нативним кодом та пам'яттю. Java 23 містить оновлення, які дозволяють розробникам легше використовувати бібліотеки C/C++, зокрема завдяки новому механізму, що знижує складність обробки викликів нативного коду, роблячи такий процес більш

інтуїтивно зрозумілим. При цьому, доступні нові можливості доступу до нативної пам'яті.

**6. Нововведення в Scoped Values.** Додано нові конструкції, дозволяючи створювати значення, які можна передавати через контексти виконання, забезпечуючи простий спосіб управління даними в багатопотокових програмах.

**7. Вдосконалення Java Collections.** Додано нові методи в List, Set та інших інтерфейсах, що дозволяє зменшити обсяг коду для операцій над колекціями.

**8. Розширення при роботі з Annotations.** Підтримка визначених користувачем анотацій у стандартних бібліотеках, що розширює можливості кастомізації анотацій у Java 23.

**9. Performance Improvements.** Оптимізовано машинний код, що покращує загальну

продуктивність програм, зокрема в багатоядерних системах.

Таким чином, Java 23 представляє собою значний крок вперед у розвитку мови та платформи, пропонуючи нові можливості, що спрощують розробку програм і підвищують їх ефективність. Такі вдосконалення як нове API для векторної графіки, поліпшення механізму узгодження патернів, а також нові можливості в Project Loom і Panama, роблять Java 23 привабливим вибором для сучасних розробників. З новими інструментами та функціями, Java продовжує залишатися однією з найпопулярніших мов програмування у світі.

### Література

- [1] <https://www.orientsoftware.com/blog/most-popular-programming-languages/>.
- [2] <https://www.oracle.com/ua/corporate/conflict-in-ukraine/>.
- [3] <https://docs.oracle.com/en/java/javase/23/>.

# Мобільний додаток для сервісу догляду за домашніми тваринами: моделювання та управління

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.043>

Вікторія Рейнська  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[v.b.reinska@nuwm.edu.ua](mailto:v.b.reinska@nuwm.edu.ua)

Тетяна Мотова  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[motova\\_ak22@nuwm.edu.ua](mailto:motova_ak22@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – У даній роботі наведено відомості про реалізацію мобільного додатку для сервісу обслуговування домашніх тварин. Проаналізовано основні функції додатку, такі як реєстрація користувачів, створення профілів тварин, бронювання послуг догляду та ветеринарного обслуговування. Розглянуто інтеграцію платіжних систем для зручного та безпечного розрахунку за послуги, а також можливість перегляду історії бронювань та отримання нагадувань про планові заходи. Запропоновано рекомендації щодо покращення інтерфейсу користувача та оптимізації продуктивності додатку, щоб забезпечити зручність і надійність для власників тварин та сервісних працівників.

**Ключові слова** – мобільний додаток, послуги, інтерфейс користувача, безпека та захист даних користувачів, ветеринарне обслуговування

## I. ВСТУП

У сучасному ритмі життя багато власників тварин не завжди мають час чи можливість повністю займатися доглядом за своїми улюбленими. Багато власників тварин відчувають певні труднощі в організації догляду за своїми чотирилапими друзями, особливо коли настають несподівані події або бракує часу через щільний графік.

Ідея розробки мобільного додатку для обслуговування домашніх тварин виникла як відповідь на зростаючу потребу власників тварин у професійних і надійних послугах. Він дозволить замовляти послуги з догляду, такі як ветеринарні консультації, грумінг, вигул собак, догляд на час від'їзду (догсітінг), та інші послуги, які можуть бути потрібні для здоров'я та благополуччя тварин..

## II. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

**Мета статті:** дослідження процесу розробки та впровадження мобільного додатку для сервісу обслуговування домашніх тварин

Основною метою додатку є полегшення життя власникам домашніх тварин, надаючи їм зручний доступ до перевірених спеціалістів. У той же час, додаток відкриває нові можливості для людей, які надають ці послуги, дозволяючи їм розширити клієнтську базу та збільшити доходи. Користувачі

додатку, такі як власники тварин, зможуть миттєво знайти необхідну послугу, незалежно від часу чи місця свого перебування, можливість планування і бронювання послуг в додатку дозволить зекономити час на пошук і організацію догляду за тваринами та буде гарантована безпека і зручність використання додатком [2].

### 1) Реалізація мобільного додатку

Мобільний додаток для обслуговування домашніх тварин може бути реалізований на основі кросплатформних технологій, таких як React Native[3] або Flutter для iOS та Android. Серверна частина буде працювати на Node.js[4] або Django, а для обміну даними використовуватимуться REST API або GraphQL. Дані зберігатимуться в PostgreSQL або MongoDB, залежно від типу інформації. Авторизація відбуватиметься через OAuth 2.0 та JWT, а шифрування забезпечить безпеку. Хмарні платформи, як AWS або Google Cloud, допоможуть у масштабуванні. Також мобільний додаток потребує не тільки функціональності, але й інтуїтивно зрозумілого та зручного інтерфейсу. Для створення дизайну інтерфейсу ідеально підходить Figma[2,5].

### 2) Функції мобільного додатку

Ключові функції додатку розроблені так, щоб забезпечити зручність користування як для власників тварин, так і для професіоналів, які надають послуги:

- У додатку буде інтегрований зручний календар, де користувачі зможуть заздалегідь бронювати час для послуг.
- Для власників собак буде корисною функція відстеження місцезнаходження тварини під час прогулянки або іншого догляду. Це допоможе власникам бути впевненими в тому, що їхні улюбленці в безпеці та під наглядом.
- Система відгуків і рейтинги. У додатку буде можливість залишати відгуки про якість наданих послуг, що сприятиме формуванню довіри між користувачами та професіоналами. Власники тварин зможуть легко орієнтуватися, обираючи найкращого грумера або ветеринара.

- Оплата послуг буде здійснюватися безпосередньо через додаток, що спростить процес розрахунку. Користувачі зможуть обрати зручний для них спосіб оплати: банківська картка, електронні гаманці тощо.

- Додаток нагадуватиме власникам про важливі події – вакцинації, візити до ветеринара, планові прогулянки чи інші заплановані заходи. Це допоможе уникнути пропущених візитів і забезпечить своєчасний догляд за тваринами.

Додаток стане не лише зручним інструментом для власників тварин, але й ефективною платформою для професіоналів, які надають послуги. Грумери, ветеринари, догсіттери, психологи, кінологи, тренери собак та інші фахівці зможуть зареєструватися на платформі, пропонуючи свої послуги новим клієнтам. Спеціалісти матимуть доступ до календаря з можливістю самостійно виставляти доступний час для бронювання послуг.

### 3) Монетизація

За кожну успішну транзакцію між клієнтом і виконавцем додаток утримуватиме невеликий відсоток. Це дозволить забезпечити стабільний дохід для підтримки і розвитку платформи.

Преміум-підписка. Користувачі, які бажають отримати додаткові переваги (наприклад, доступ до ексклюзивних послуг або пріоритетне обслуговування), зможуть оформити преміум-підписку.

Також додаток стане чудовою платформою для реклами товарів та аксесуарів для домашніх тварин. Компанії, що продають корми, іграшки чи ветеринарні препарати, зможуть розміщувати рекламу безпосередньо у додатку.

### 4) Розвиток мобільного додатку

Ринок послуг для домашніх тварин активно розвивається, тому створення такого додатку може стати вигідною інвестицією. Конкурентними перевагами даної платформи є:

Додаток буде зручним і простим у використанні навіть для тих, хто не часто користується технологіями.

Відвідування ветеринара, грумінг, догляд під час від'їзду, тренування – усе це можна буде знайти в одному місці.

Додаток дозволить користувачам отримувати персоналізовані рекомендації залежно від потреб їхніх тварин.

У майбутньому цей мобільний додаток може стати справжнім "помічником" для кожного власника домашніх тварин. З його допомогою можна буде не тільки замовляти послуги, але й отримувати поради щодо догляду, відстежувати здоров'я улюбленців, а також брати участь у заходах для тварин.

Платформа може також вийти на міжнародний ринок, забезпечуючи доступ до послуг не тільки в межах одного міста чи країни, але й по всьому світу. Це дозволить власникам тварин знайти необхідні послуги навіть під час подорожей.

## III. ВИСНОВКИ

Мобільний додаток для сервісу обслуговування домашніх тварин – це інноваційний підхід до вирішення проблеми догляду за улюбленими. Він створює нові можливості як для власників тварин, так і для професіоналів, відкриваючи ринок послуг у новому форматі. Така платформа стане незамінним інструментом у повсякденному житті любителів тварин.

## ЛІТЕРАТУРА

[1] Mobile Application for Pet Care Services: Design and Implementation. URL: [https://www.researchgate.net/publication/373733911\\_Android\\_Mobile\\_Application\\_System\\_for\\_Pet\\_Care\\_Services\\_Using\\_MVVM\\_Architecture](https://www.researchgate.net/publication/373733911_Android_Mobile_Application_System_for_Pet_Care_Services_Using_MVVM_Architecture) (дата звернення: 14.10.2024)

[2] Pet Care Management Using Mobile Apps: A Case Study. URL: <https://www.eliftech.com/case-studies/pet-care-app/> (дата звернення: 14.10.2024)

[3] Nader Dabit. React Native in Action.

[4] Mario Casciaro. Node.js Design Patterns.

[5] "Designing with Figma" URL: <https://www.figma.com>. (дата звернення: 14.10.2024).



# *Інформаційні технології у вирішенні проблем фіскалізації підприємств: дослідження електронного кабінету платників*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.044>

Рейнська Вікторія,  
Національний університет водного  
господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[v.b.reinska@nuwm.edu.ua](mailto:v.b.reinska@nuwm.edu.ua)

Колесник Марія  
Національний університет водного господарства  
та природокористування  
Рівне, Україна  
[kolesnyk\\_ak23@nuwm.edu.ua](mailto:kolesnyk_ak23@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – У статті досліджено основні проблеми роботи ФОП-ів із електронним кабінетом платників податків. Дослідження цієї проблеми є актуальною в Україні, адже це впливає на розвиток бізнесу в країні. Порушується питання чи розуміють підприємці що таке електронний ключ та яку інформацію він в собі несе.

**Ключові слова** – електронний кабінет платників податку, ФОП, електронний ключ, підприємець, фіскалізація підприємств.

## I. ВСТУП

Чимало підприємств, які допомагають ФОП-ам фіскалізуватись зіштовхуються із проблемами на перших етапах роботи – збір інформації. Люди не розуміють як працює Електронний кабінет платників податків, не розуміють що таке електронний ключ ФОП-а, та не розуміють що він в собі містить і як працює. Що перешкоджає якісній роботі обох сторін.

## II. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

**Мета статті:** Метою статті є формування рекомендацій щодо вирішення проблеми розуміння роботи з електронним кабінетом платників податків.

Існують компанії, які працюють у сфері автоматизації малого і середнього бізнесів. В їх роботу входить, зібрати дані клієнта, щоб передати їх бухгалтеру на реєстрацію електронного ключа в податковій, реєстрація особистого кабінету у обраному клієнтом ПРРО, та запуск роботи ПРРО. І досить часто в своїй роботі вони зіштовхуються із такою проблемою - люди не розуміють як працює Електронний кабінет платників податків, не розуміють що таке Електронний ключ ФОП-а, та не розуміють що він в собі містить і як працює.

### 1) Електронний кабінет податків

Електронний кабінет платника податків – це сервіс, створений урядом для можливості реалізовувати платником податків свої права та обов'язки в електронному вигляді. Завдяки

впровадженню цієї системи стала можливою відправка електронних документів до органів ДПС, подання податкової звітності, отримання деяких довідок (наприклад, про відсутність заборгованості), отримання іншої інформації із загальнодоступних реєстрів, а також надсилання різноманітних запитів чи заяв з метою отримання необхідних податкових даних, пов'язаних з власною діяльністю – і все це в електронному вигляді. Загалом Е-кабінет складається з відкритої частини, що містить загальнодоступну інформацію, та приватної частини – суто особистий кабінет.

### 2) Фіскалізація

Згідно із Законом 3219, загальна фіскалізація стосується всіх підприємств, що при веденні бізнесу проводять розрахункові операції. Підприємцям необхідно фіскалізуватись, а для цього потрібна їх обізнаність у роботі із податковою. В інтернеті хоч і є достатньо інформації для того щоб дізнатись як працює ти чи інше, але частина сайтів написано науковими словами, що не завжди є зрозумілими і врахуємо ще те, що частина ФОП-ів це люди середнього та старшого віку, які не завжди вміють користуватись браузером та сучасними технологіями. Окрім цього, не усі бухгалтери знають як подавати потрібні звіти для реєстрації ПРРО в податковій. Часто вони знаються лише на підрахунку та фінансових операціях. На основі цього було знайдено рішення як можна полегшити роботу і ФОП-ам і компаніям, які допомагають фіскалізувати підприємства.

### 3) Варіанти вирішення проблеми

Для вирішення цієї проблеми є наступні рішення:

- Онлайн курси для починаючих ФОП-ів по роботі з Електронним кабінетом платників податку. Кожен починаючий ФОП попередньо зможе пройти ці курси та вже мати базове розуміння особистого кабінету платників податку, що він у собі містить та як функціонує

- Оформлення і підтримка Ютуб каналу де буде розглянуто кожен пункт кабінету, пояснення про електронні ключі, та які є варіанти фіскалізації бізнесу. Для цього необхідна людина, яка є професіоналом в цій справі. Будуть зроблені відео, які розглядають електронний кабінет до дрібниць по кожному пункту.

- Онлайн підтримка клієнтів, які фіскалізувались через чат-бот. Де будуть задіяні відповідні спеціалісти та зможуть дати відповідь на популярні питання.

- Офлайн кабінет, де клієнти стаціонарно можуть вирішити свої питання по реєстрації ФОП-а, роботі з Електронним кабінетом платника. Адже багатьом людям важливо бачити із ким вони працюють та поговорити вживу.

### III. ВИСНОВКИ

Для того щоб сформувати якісний бізнес потрібно не тільки почати, а і розуміти як все працює зсередини, хоча б на базовому рівні. Це допоможе і самим ФОП-ам почувати себе впевненіше і людям які безпосередньо працюють із ними.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Брадул О. М., Адамовська В. С., Шепелюк В. А. «Перспективи впровадження електронний кабінет платника податків – Дія»  
URL: <https://snku.krok.edu.ua/index.php/vcheni-zapiski-universitetu-krok/article/view/312/340> (дата звернення: 14.10.2024)
- [2] БІП «Електронний кабінет платника податків»  
URL: <https://bip.net.ua/articles/elektronnyj-kabinet-platnyka-podatkov-yedy-na-nadij-na-ta-bezkoshtovna-programa-dlya-roboty-fop-z-podatkovoyu/> (дата звернення: 14.10.2024)
- [3] Електронний кабінет платників податків  
URL: <https://cabinet.tax.gov.ua/>
- [4] Закон Укоаїни від 30 червня 2023 року №3219-ІХ «Про внесення змін до Податкового кодексу Укаїни та інших законів Укаїни щодо особливостей оподаткування у період дії воєнного стану»  
URL: <https://tax.gov.ua/zakonodavstvo/podatkovozakonodavstvo/zakoni-ukraini/78340.html>



***СЕКЦІЯ 4  
ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IoT) ТА ШТУЧНИЙ  
ІНТЕЛЕКТ***

# Utilizing Dataisland to Create Interactive Maritime English Exercises

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.045>

Olena Diahyleva

English language department for maritime officers  
(AP) Kherson State Maritime Academy  
Kherson, Ukraine  
mz@ksma.ks.ua

Alona Yurzhenko

English language department for maritime officers (AP)  
Kherson State Maritime Academy  
Kherson, Ukraine  
yurzhenko.alona@ksma.ks.ua

Olena Kononova

Ship engineering department  
Maritime Applied College of KSMA  
Kherson, Ukraine  
konon2017@ukr.net

**Abstract** – The paper is devoted to the use of new platform to secure, process and store data (Dataisland). The advantages of using Dataisland are listed in the research. It is highlighted that the platform helps Maritime English teachers to develop interactive exercises which could be useful to form communicative competence of future seafarers. Strong security measures are provided to protect created content, the updates are periodical.

**Keywords** – artificial intelligence; maritime professionals; e-learning; digitalization.

## I. INTRODUCTION

With the advent of artificial intelligence (AI), there is a growing need to equip teachers with the necessary skills to integrate AI tools into the teaching process effectively [1]. As AI-driven technologies become more prevalent in educational settings, teachers must be trained to understand these tools and use them strategically to enhance student learning outcomes. This includes learning to use AI for personalized learning experiences and assessing student performance [2].

AI can support teachers by offering real-time feedback on student work, generating customized learning plans, or helping to identify gaps in student understanding. However, for these benefits to be fully realized, educators must be taught how to navigate and utilize AI platforms, adapt their teaching methods accordingly, and ensure that AI complements, rather than replaces, human-centered pedagogy [3].

Developing a teacher's proficiency in AI will empower them to enhance their teaching methods and provide more personalized learning experiences for their students. By integrating AI tools and technologies into their curriculum, teachers can better analyze student data, identify learning gaps, and create tailored lesson plans to address individual needs. Additionally, AI can assist teachers in grading assignments faster and more accurately, freeing up time for them to focus on developing critical thinking and problem-solving skills

in their students [4]. Ultimately, empowering teachers with proficiency in AI will enable them to adapt to the rapidly changing educational landscape and better prepare students for the demands of the future workforce [5].

## II. MAIN PART

Dataisland is used by Kherson State Maritime Academy to facilitate the digital transformation of its educational and administrative processes. Specifically, this platform enables the seamless management and integration of large volumes of data, helping maritime institutions to optimize both learning and operational efficiency.

For educational purposes, Dataisland supports the use of AI-driven analytics to track student performance, offer personalized feedback, and assess competency in real-time. This is particularly beneficial in maritime training, where the curriculum often includes complex, practical tasks that require continuous evaluation and improvement. By analyzing data from simulations, tests, and practical exercises, the platform helps instructors identify areas where students may need additional support, thus tailoring the learning experience to each individual's needs [6].

Dataisland can help teachers create tests by providing various question formats, customization options, and instant feedback for grading. Teachers can easily generate multiple-choice questions, fill-in-the-blank questions, and short-answer questions, including multiple-choice, and problem-solving tasks, all of which can be adapted to the unique demands of maritime education and more with Dataisland's user-friendly platform. This tool can streamline the test creation process and make it more efficient for educators [7].

Dataisland can help teachers create tests that are not only efficient but also tailored to the specific learning

needs and objectives of maritime students. By utilizing AI and data analytics, the platform can assist teachers in generating customized assessments that align with course content and the competencies required in maritime professions [8].

Dataisland can analyze the curriculum and learning materials to automatically generate tests that cover key concepts and competencies [9]. Dataisland can help teachers create tests that are not only efficient but also tailored to the specific learning needs and objectives of maritime students. By utilizing AI and data analytics, the platform can assist teachers in generating customized assessments that align with course content and the competencies required in maritime professions.

By tracking student progress over time, Dataisland can create different-level tests for students. The platform uses data on individual performance and learning gaps to develop assessments that challenge students at the right level of difficulty, ensuring that both advanced and struggling students are appropriately assessed [10].

After the tests are completed, Dataisland can automatically grade certain types of questions, such as multiple-choice or true/false, and provide detailed feedback to students. For more complex, open-ended questions, AI-powered algorithms can assist teachers in grading by offering suggestions or identifying patterns in student responses, saving time and ensuring consistency.

Dataisland supports adaptive testing, where the difficulty of questions adjusts based on the student's responses. This approach ensures that students are continuously challenged without being overwhelmed, helping teachers gauge the depth of student understanding more accurately [11].

Teachers can access real-time data on test results, allowing them to identify trends, such as common mistakes or areas where the entire class may be struggling. This data-driven approach enables instructors to make informed decisions about reteaching certain concepts or adjusting the curriculum to address learning gaps.

Since maritime education often involves strict adherence to international standards and certification requirements, Dataisland ensures that the tests teachers create are aligned with regulatory frameworks, such as those set by the International Maritime Organization (IMO) [12]. Teachers can ensure that their assessments meet the necessary guidelines for certifying future maritime professionals.

Teachers can collaborate on test creation within the Dataisland platform by sharing question banks, templates, and test designs with colleagues across departments or even different maritime institutions. This fosters a collaborative learning environment and helps standardize assessments to meet global educational standards.

Here's an example of multiple-choice questions generated by Dataisland on the topic "Types of Ships"

[13]. These questions assess students' understanding of different ship classifications, their uses, and characteristics.

**Topic: Types of Ships**

1. Which type of ship is specifically designed to transport liquid cargo, such as oil or chemicals?
  - a) Container ship
  - b) Bulk carrier
  - c) Tanker
  - d) Ro-Ro ship
  
2. What is the primary purpose of a container ship?
  - a) To carry passengers across long distances
  - b) To transport large quantities of liquid cargo
  - c) To transport goods in standardized containers
  - d) To carry vehicles and other rolling cargo
  
3. Which of the following ships is used to transport dry bulk cargo like grain, coal, or iron ore?
  - a) Passenger ship
  - b) LNG carrier
  - c) Bulk carrier
  - d) Ferry
  
4. Ro-Ro ships are specifically designed to carry which type of cargo?
  - a) Bulk cargo
  - b) Liquid cargo
  - c) Vehicles and wheeled equipment
  - d) Hazardous chemicals
  
5. What is the main feature of a Liquefied Natural Gas (LNG) carrier?
  - a) It is equipped with special tanks to keep natural gas in a liquid state
  - b) It carries dry cargo in bulk
  - c) It transports containerized goods across oceans
  - d) It is primarily used to carry crude oil and petroleum products

Figure 1. Example of a test

These questions cover a range of ship types and their primary uses, helping students to differentiate between various ship categories in the maritime industry. The answers provide immediate feedback, and the test can be adjusted based on student performance using Dataisland's adaptive testing features.

Also the Dataisland platform helps Maritime English teachers develop interactive exercises that are highly effective in fostering the communicative competence of future seafarers. In the maritime industry, effective communication is crucial, especially for ensuring safety, coordinating operations, and adhering to international standards such as those set by the IMO [14]. By leveraging the capabilities of Dataisland, teachers can create dynamic, interactive exercises that go beyond traditional teaching methods, engaging students in real-life scenarios where communication is key.

Students can practice communication skills in simulated environments that mirror real-world shipboard situations, for example, students can role-play scenarios like fires, collisions, or equipment failures, where effective communication can be a matter of life and death [15].

Dataisland's AI capabilities provide real-time feedback on students' language use during exercises. For example, after completing an interactive communication exercise, the system can analyze:

- **Pronunciation Accuracy:** highlighting areas where students need improvement.
- **Grammar and Vocabulary Usage:** assessing the proper use of maritime-specific terms and



providing suggestions for alternative phrases [16].

- **Response Time and Clarity:** evaluating how quickly and clearly a student can respond to a situation.

This immediate feedback helps students refine their communication skills more effectively than traditional methods, allowing them to see where they can improve and practice continuously until they reach the required proficiency level.

The platform encourages collaborative exercises where students work together in pairs or groups to solve maritime challenges that require communication. Role-playing scenarios such as the ship's engine cooling system fails, leading to overheating, troubleshooting the ship's oil purifiers, which remove impurities from the fuel or lubricating oil, oversee ballast water exchange to ensure the ship's stability and comply with international ballast water regulations, the steering gear or propulsion system, breaks down etc.

- 1. Engine Room Emergency:**  
Scenario: A sudden fire breaks out in the engine room. Students must coordinate with the crew on the bridge, the firefighting team, and other engineers to manage the emergency, contain the fire, and shut down critical systems to prevent further damage.  
Communication Focus: Clear reporting of engine conditions, giving instructions to support firefighting efforts, and coordinating with other departments in a time-critical situation.
- 2. Engine Malfunction at Sea:**  
Scenario: While at sea, the main engine suddenly stops due to a mechanical failure. The engineering team must diagnose the issue, communicate with the captain, and perform necessary repairs, all while providing regular status updates.  
Communication Focus: Describing technical problems accurately, explaining repair procedures, and updating the bridge on progress and estimated repair times.
- 3. Routine Engine Maintenance:**  
Scenario: During a routine inspection, engineers discover that parts of the engine need to be serviced or replaced. The team must communicate with the chief engineer, coordinate the maintenance schedule, and order parts, ensuring the ship remains operational.  
Communication Focus: Reporting technical assessments, planning maintenance activities with other departments, and explaining potential impacts on ship operations.
- 4. Fuel Transfer and Bunkering:**  
Scenario: Engineers need to coordinate the transfer of fuel from one tank to another or during bunkering operations at port. The exercise involves communicating with the deck crew, port authorities, and fuel suppliers to ensure the operation is safe and efficient.  
Communication Focus: Following safety protocols, ensuring proper documentation, and clearly communicating fuel levels and transfer progress.
- 5. Pollution Prevention Incident:**  
Scenario: An oil or chemical spill is detected in the engine room, and engineers must work quickly to prevent environmental contamination. The team must notify the bridge, activate containment procedures, and report the incident to authorities.  
Communication Focus: Reporting the environmental incident, detailing the actions being taken, and ensuring compliance with MARPOL regulations.

Figure 2. Example of a real life situations

These role-playing tasks are essential for developing not only the language skills but also the soft skills needed for teamwork and leadership in maritime operations.

Dataisland allows teachers to design interactive quizzes that assess communicative competence through multimedia formats. These quizzes can incorporate:

- **Audio Clips of Real Maritime Conversations:** students can listen to these clips and answer comprehension questions or engage in follow-up conversations, ensuring

they understand the nuances of spoken Maritime English.

- **Videos of Ship Operations:** teachers can use videos that require students to describe ongoing operations or respond to verbal instructions, simulating real-world communication exchanges [17].
- **Speech Recognition Exercises:** students can practice giving orders or responding to commands, with the platform analyzing their pronunciation and fluency.

To increase engagement, Dataisland incorporates gamified elements into exercises, where students can compete in language challenges, earn points, and progress through different levels of difficulty. Students must respond quickly and accurately to a series of maritime communication scenarios, earning points for speed and precision. Gamification adds a layer of motivation, making the learning process enjoyable and helping students stay engaged while building communicative competence.

The Dataisland platform can analyze each student's progress and adapt exercises to meet their individual needs. If a student struggles with particular phrases or terms used in maritime operations, the system can generate exercises focused on these areas.

Depending on the student's pronunciation or fluency issues, the platform can create tailored speaking drills that focus on improving specific aspects of their communication.

Exercises can be adapted in real-time to gradually increase in complexity as the student's communicative competence improves. This ensures that each student is challenged appropriately and progresses at their own pace, leading to better long-term retention and mastery of Maritime English.

As to the key advantages of using Dataisland for teachers, we can name automated assessment and feedback as Dataisland automates the grading of quizzes, tests, and assignments, saving teachers time on repetitive tasks.

Students receive real-time feedback on their performance, which helps them understand mistakes and improve without waiting for manual grading.

Teachers can incorporate videos, audio clips, and interactive elements into lessons to make learning more engaging, particularly for language or technical subjects.

Teachers can track student progress through detailed performance data, identifying trends, strengths, and weaknesses across individuals and the class. This data helps teachers make informed decisions about reteaching certain concepts, adjusting lesson plans, or providing additional support to specific students.

The platform simplifies the process of creating lessons, quizzes, and tests by offering pre-built

templates and content generation tools. Teachers also can share resources, question banks, and lesson plans with colleagues, share best practices, and collaborate on joint projects, making it easier to exchange ideas and improve teaching methods allowing for the collaborative development of educational materials.

Dataisland provides robust security measures to protect the content created by teachers, ensuring that sensitive data remains secure and accessible only to authorized users. All data transmitted between users (teachers, students) and the Dataisland platform is encrypted using industry-standard encryption protocols (e.g., SSL/TLS). This ensures that data, including lesson plans, tests, and student records, is protected from unauthorized access during transmission.

Dataisland conducts regular updates to its software and security infrastructure to address new vulnerabilities and enhance system protection. These updates are automatically applied to keep the platform secure without disrupting user activities.

### III. CONCLUSION

Dataisland empowers maritime educators to create comprehensive, data-driven tests that assess both theoretical knowledge and practical skills. Through automation, personalization, and AI-driven insights, the platform streamlines the test creation process while ensuring that assessments are aligned with the specific needs and requirements of maritime education.

Dataisland platform revolutionizes how Maritime English is taught, providing maritime educators with the tools to create immersive, interactive, and data-driven exercises that build communicative competence. By simulating real-world scenarios, offering real-time feedback, and allowing for personalized learning paths, Dataisland ensures that future seafarers are well-prepared to communicate effectively in high-stakes maritime environments. This ultimately enhances safety, efficiency, and collaboration in global maritime operations.

By using Dataisland, teachers can streamline their teaching processes, create engaging learning experiences, and better support students in achieving their educational goals while enhancing their own efficiency and effectiveness.

### ACKNOWLEDGMENT

The completion of this research was made possible by the support and resources available at Kherson State Maritime Academy. We appreciate the conducive environment and the encouragement provided by our higher education institution.

### REFERENCES

- [1] Q. Lu, L. Zhu, X. Xu, J. Whittle, D. Zowghi, and A. Jacquet, "Responsible AI pattern catalogue: A collection of best practices for AI governance and engineering," *ACM Computing Surveys*, vol. 56, no. 7, pp. 1-35, 2024.
- [2] M. Masalkhi, J. Ong, E. Waisberg, and A. G. Lee, "Google DeepMind's gemini AI versus ChatGPT: A comparative analysis in ophthalmology," *Eye*, pp. 1-6, 2024.
- [3] Y. Bengio, G. Hinton, A. Yao, D. Song, P. Abbeel, T. Darrell, et al., "Managing extreme AI risks amid rapid progress," *Science*, vol. 384, no. 6698, pp. 842-845, 2024.
- [4] B. Díaz and M. Nussbaum, "Artificial intelligence for teaching and learning in schools: The need for pedagogical intelligence," *Computers & Education*, p. 105071, 2024.
- [5] N. Ghamrawi, T. Shal, and N. A. Ghamrawi, "Exploring the impact of AI on teacher leadership: regressing or expanding?," *Education and Information Technologies*, vol. 29, no. 7, pp. 8415-8433, 2024.
- [6] O. S. Diahyleva, I. V. Gritsuk, O. Y. Kononova, and A. Y. Yurzhenko, "Computerized adaptive testing in educational electronic environment of maritime higher education institutions," in *CTE Workshop Proceedings*, vol. 8, pp. 411-422, Mar. 2021.
- [7] T. Zaytseva, "Simulation modeling as a means of solving professionally-oriented problems in maritime industry," available: [https://www.researchgate.net/publication/353414444\\_Simulation\\_Modeling\\_as\\_a\\_Means\\_of\\_Solving\\_Professionally-Oriented\\_Problems\\_in\\_Maritime\\_Industry](https://www.researchgate.net/publication/353414444_Simulation_Modeling_as_a_Means_of_Solving_Professionally-Oriented_Problems_in_Maritime_Industry). [Accessed: Oct. 5, 2023]
- [8] *Application of Artificial Intelligence to Assessment*, Information Age Publishing, Incorporated, United States, 2020.
- [9] S. Mackney and R. Shields, "Learning analytics for student success at university: trends and dilemmas," in *The Educational Intelligent Economy: Big Data, Artificial Intelligence, Machine Learning and the Internet of Things in Education*, Emerald Publishing Limited, 2019, pp. 251-268.
- [10] R. Z. Pek, S. T. Özyer, T. Elhage, T. Özyer, and R. Alhadjj, "The role of machine learning in identifying students at-risk and minimizing failure," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 1224-1243, 2022.
- [11] . D. Cavallucci, P. Livotov, and S. Brad, Eds., *Towards AI-Aided Invention and Innovation: 23rd International TRIZ Future Conference, TFC 2023, Offenburg, Germany, September 12–14, 2023*, Proceedings, vol. 682. Springer Nature, 2023.
- [12] L. Bilgili and A. I. Ölçer, "IMO 2023 strategy-Where are we and what's next?," *Marine Policy*, vol. 160, p. 105953, 2024.
- [13] V. Kudryavtseva, T. Malakhivska, O. Moroz, Yu. Petrovska, and O. Frolova, *Welcome Aboard: Coursebook*. Kherson: "STAR" PH, 2018, 294 p.
- [14] A. Halff, L. Younes, and T. Boersma, "The likely implications of the new IMO standards on the shipping industry," *Energy Policy*, vol. 126, pp. 277-286, 2019.
- [15] O. Diahyleva, A. Yurzhenko, and O. Kononova, "Design of flipped classroom lesson in educational electronic environment of maritime higher education institutions," *Scientific Bulletin of Mukachevo State University. Series "Pedagogy and Psychology"*, vol. 9, no. 3, pp. 45-53, 2023. DOI: 10.52534/msu-pp3.2023.45
- [16] O. A. Tsyganenko, "Specific Requirements Associated with Teaching English for Specific Purposes Provided to Maritime Cadets," *Young Scientist: Scientific Journal*, no. 7.2 (71.2), pp. 156-159, Kherson: Helvetica, 2019.
- [17] A. Yurzhenko, "The use of learningapps gamification activities as controlled exercises in MOODLE e-course," *Pedagogical Sciences: Theory, History, Innovative Technologies*, no. 1 (85), pp. 278-288, Sumy: SumDPU named after A. S. Makarenko, 2019.

# *A hybrid AI model for forecasting electricity volume to optimize water supply company efficiency*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.046>

Serhii Klimov

National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
s.v.klimov@nuwm.edu.ua

Tetiana Starovoyt

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky  
Kyiv Polytechnic Institute"  
Kyiv, Ukraine  
starovoyt.tania@kpi.kpi.ua

**Abstract**— Most water supply companies consume a large amount of electricity to ensure technological processes of water purification and distribution. However, even though Vodokanals are a large consumer of electricity, the forecasting of electricity consumption is still not given priority. An accurate forecast of the amount of electricity consumption will allow optimization of the distribution of consumption, reducing the values of peak consumption and in general reducing the electricity costs. In this study, deep learning methods are proposed to predict the daily electrical load during a month. Where the performance of deep learning artificial neural networks and hybrid neural networks are compared, this study, based on the comparison of various deep learning methods, proposes to increase the effectiveness of the application of artificial neural networks by their hybridization, to forecast the daily electrical load in the monthly period. We combined the gray wolf optimizer (GWO) and the group data processing method (GMDH) to predict the optimal amount of electrical load in water utilities. **Keywords**—extrapolation; forecasting; observation data; plotting position formulas; uncertainty.

**Keywords**— power consumption forecasting, deep learning, gray wolf optimizer, artificial neural networks, GMDH-GWO.

## I. INTRODUCTION

Electricity load forecasting is a critically important task for water supply companies, as it will allow developing measures to increase the stability of the electricity supply system, economic efficiency, and reliability of water supply. More accurate forecasting makes it possible to optimize the use of energy resources, predict the need for backup power, and ultimately reduce the man-made load on the natural environment. With demand forecasting, generators can produce optimal power levels and save energy resources, and utilities get enough time to develop and implement plans to balance electricity consumption and ensure the functioning of related systems.

Water utilities with an energy management policy in place consume less energy than similar utilities without one [7] but many water utilities still do not have such a policy. Given the changing energy landscape, having a guiding set of energy principles is now more important than ever. Water utilities may benefit from additional research on the type, scope, and effectiveness of energy

management policies specific to them, as well as best practice recommendations for developing and adopting such policies for their unique circumstances [8].

Energy management at the water utility level faces a major challenge in obtaining the necessary information. Water utilities struggle to track basic energy usage data, even on a monthly or yearly basis. While these utilities already monitor pressure, flow, and water quality at multiple sites with intervals of less than an hour, it's equally important for them to extend this practice to energy monitoring [8]. In the future, water utilities need to be just as proficient in processing energy data as they are in processing water data. As energy transactions become more dynamic and digital, the water sector must intensify its efforts to effectively manage relevant data to its advantage.

Forecasting electricity consumption accurately is challenging due to various influencing factors, such as population, economic development, electricity infrastructure, and climatic conditions. Many studies have been conducted to develop power consumption forecasting models, which are generally classified into three categories: nonlinear intelligent models, statistical analysis models, and gray forecasting models.

Just as energy can be saved by optimally scheduling pumps, energy can be saved by optimally distributing water sources. For large water supply systems with several interchangeable water sources, one of the simple but underused methods is source selection [8].

The category of nonlinear models mainly includes techniques such as artificial neural networks and support vector machines. For instance, Bouzerdoum et al. [16] introduced an innovative approach for short-term PV power forecasting by combining SARIMA and SVM models. This hybrid model demonstrates exceptional accuracy, surpassing individual SARIMA and SVM models, and effectively estimates small-scale power generation without depending on forecasted meteorological parameters. However, its accuracy relies on having sufficient training data and experience.

The Universal Approximation Theorem asserts that an Artificial Neural Network (ANN) can effectively approximate any nonlinear function. ANN models have been utilized for forecasting electricity demand since the 1990s and have consistently shown promising results [5,

6]. Recent advancements in computing power and cutting-edge algorithms have led to the development of neural networks using machine learning techniques, particularly deep neural networks (DNN), which have become one of the primary methods for forecasting electricity demand. This has been made possible by enhancing the abstraction capabilities of model functions. The ability of Long Short-Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU) networks, which are based on Recurrent Neural Networks (RNN), to handle sequential data and long-term dependencies during the extraction of complex patterns in data has significantly contributed to their popularity among researchers [5, 6].

The research community is increasingly focusing on hybrid methods to improve energy modeling. These methods combine different approaches or strategies, using the strengths of each to improve the accuracy and efficiency of energy models. Additionally, the researchers applied metaheuristic techniques, which include sophisticated intelligent algorithms, to fine-tune the parameters of these models, optimizing them for superior results. This synergy of hybrid and AI-based methodologies paves the way for advancements in energy modeling. Heirkha et al. developed a novel algorithm that integrates artificial neural networks (ANN), principal component analysis (PCA), data envelopment analysis (DEA), and ANOVA methods to estimate and forecast electricity demand. This algorithm considered seasonal and monthly variations, using pre-processing and post-processing to improve the performance of the ANN model. The effectiveness of this approach was demonstrated using electricity consumption data in Iran, which produced accurate estimates.

In this study, for the first time, it is proposed to combine the gray wolf optimizer (GWO) and the group data processing method (GMDH) to predict the optimal amount of electrical load in water supply companies. The use of these methods allows you to automate the modeling process, optimize the model structure, and ensure high accuracy of forecasting, considering complex, non-linear dependencies.

## II. MATERIALS AND METHODS

### *A. Description of the process of electricity consumption by pumping stations and preparation of data for modeling*

Pumping stations in water supply companies are the main components that ensure the transportation of water from water intake sources (rivers, reservoirs, wells, etc.) to consumers through the pipeline system. They differ in types, power, productivity, and specifics of use, depending on the needs and features of the water supply system.

The most common types of pumps in water supply companies are:

- Centrifugal pumps are the most common due to their reliability, ability to work at high speeds,

and provide a large flow of water. They are used to supply large volumes of water from water intakes to consumers through a network of pipelines.

- Piston pumps are used to supply water under high pressure, in high-pressure systems, in high-rise buildings. They are often used to transport water to high-rise buildings or to supply water to systems with high resistance.
- Rotary pumps are used in specific cases, for example, for raising water from underground wells.

Pump performance ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) determines the volume of water that the pump can pump per unit of time. Power (kW) determines the amount of electricity required to operate the pump. The power depends on the height of the water rise (pressure) and the volume of water that is pumped.

Pumps are often equipped with frequency converters, which allow you to adjust their speed according to the needs of the system. This ensures flexible management and more efficient use of energy. Modern systems often have automated control systems (SCADA), which allow you to monitor the condition of the pumps and quickly respond to changes in the load or malfunctions.

Most of the energy is used to pump water, overcome the hydraulic resistance of pipelines, and lift the water to the necessary height. The pump consumes more energy when lifting water to greater heights or over longer distances. Additionally, some water systems require energy to filter, clean, and treat water before it is supplied to consumers.

By predicting water consumption, pumps can be adjusted by reducing their power during low consumption or peak loads. This reduces electricity costs and reduces the load on electrical networks. The use of water storage tanks also allows water to be stored during periods of low demand and reduces the load on pumps during periods of peak consumption.

In this study, we used data on electricity consumption by pumping stations for water distribution problems over the past five years. Using machine learning methods (cluster analysis), they were divided into groups of high consumption, moderate consumption, and abnormal consumption. Further simulation results are described in the following sections.

An example of the distribution of electricity consumption by the water supply company over the past five years (for security reasons, we do not specify the name) into cluster groups is shown in Figure 1.

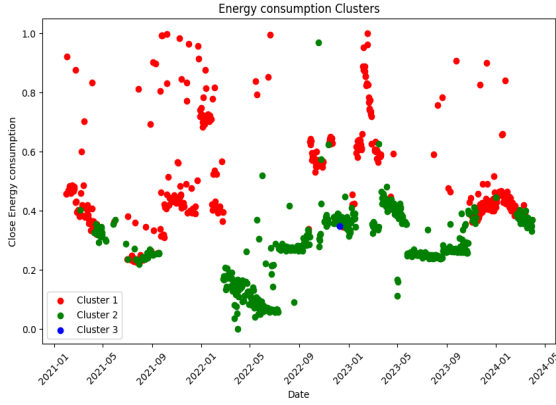


Figure 1. Division into clusters of electricity consumption groups by the water supply company

In Figure 1, the electricity consumption by the water supply company is divided into three clusters, where the first group of clusters indicates a high volume of consumption, the second group of clusters indicates a moderate volume, and the third group indicates anomalies in the consumption of electricity to pump the required volume of water. The dynamics of electricity consumption by month is shown in Figure 2.

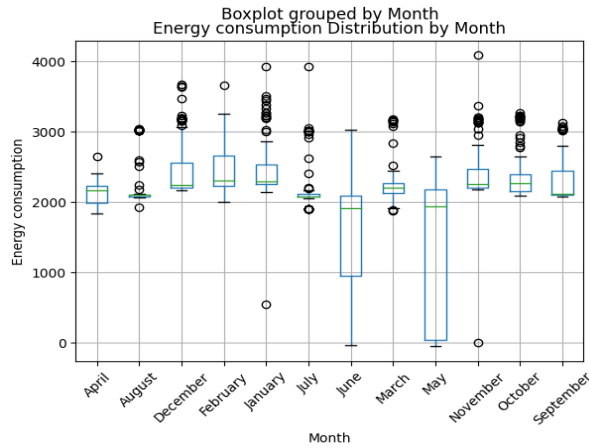


Figure 2. An example of electricity consumption by a water supply company

### B. Gray Wolf Optimization Algorithm (GWO)

The GWO method is a metaheuristic algorithm inspired by the life of gray wolves, which simulates the leadership hierarchy and how gray wolves hunt in the wild. The leadership hierarchy is divided into four groups of wolves; alpha provides the first most acceptable solution, beta provides the second most acceptable solution, delta provides the third most acceptable solution, and finally, omega provides the remaining available solutions [15].

The gray wolf algorithm is divided into three stages: searching for prey (Equation 1), surrounding prey (Equation 2), attacking prey.

**Search for prey (reconnaissance).** Gray wolves look for solutions near the alpha, beta, and delta positions. Mirjalili and others. (2014), use  $A$  with random values greater than 1 or less than  $-1$  to force gray wolves to disperse and improve exploration to

allow the algorithm to perform a global search in the search space.

**Prey environment.** At this step, the prey is surrounded by a pack of gray wolves. The mathematical model of the prey environment is described below (formulas 1 - 2) [15].

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{x}_p(t) - \vec{x}(t)| \quad (1.1)$$

$$\vec{x}(t+1) = \vec{x}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (1.2)$$

where,  $t$  is the current iteration,  $\vec{A}$  and  $\vec{C}$  are coefficient vectors,  $\vec{x}_p$  the vector of the position of the victim,  $\vec{x}$  is the vector of the position of the gray wolf. Vectors  $\vec{A}$  and  $\vec{C}$  are determined using the following equations [15]:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (1.3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (1.4)$$

where,  $a$  linearly decreases from 2 to 0 during iterations of the algorithm.  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$  are random vectors in the interval  $[0, 1]$ .

**Hunting.** Alpha ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), and delta ( $\delta$ ) wolves participate in the hunting process, with alpha ( $\alpha$ ) representing the best solution in the pack, beta ( $\beta$ ) the second best solution, and delta ( $\delta$ ) the third best solution. The first three best solutions are kept and the other wolves update their current positions randomly in the search space. The behavior of wolves is modeled using the following equations [15]:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_\alpha \cdot \vec{x}_\alpha - \vec{x}| \quad (2.1)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_\beta \cdot \vec{x}_\beta - \vec{x}| \quad (2.2)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_\delta \cdot \vec{x}_\delta - \vec{x}| \quad (2.3)$$

$$\vec{x}_1 = \vec{x} - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \quad (2.4)$$

$$\vec{x}_2 = \vec{x} - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \quad (2.5)$$

$$\vec{x}_3 = \vec{x} - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (2.6)$$

$$\vec{x}(t+1) = \frac{\vec{x}_1 + \vec{x}_2 + \vec{x}_3}{3} \quad (2.7)$$

where,  $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3$ , represent the alpha ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) and delta ( $\delta$ ) positions of the wolf,  $\vec{x}(t+1)$  is the updated next position of the wolf.  $\vec{x}_\alpha, \vec{x}_\beta, \vec{x}_\delta$  are the first three best solutions [15].

**Prey attack.** The hunting process of gray wolves ends when the prey stops moving.

The current study begins by using the GWO method to solve an optimization model for energy consumption forecasting accuracy. The GWO algorithm is then used to determine the best weights for prediction algorithms and to predict the amount of test data. After that, the prediction accuracy indicators of the GWO algorithm are calculated [15].

### C. Forecasting the optimal amount of electrical load based on time series forecasting

The Group Data Processing Method (GMDH) is a self-organized learning technique that enables you to manage the process of a complex model from the input set to the output data and determine the model's parameters. The GMDH network creates a connection



between the input and the output, which is referred to as a series of Volterra functions or a function of the Kolmogorov–Gabor polynomial [12, 13].

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (3)$$

Group GMDH transforms neurons into more complex units with polynomial transfer functions and simplifies the communication between neurons while developing automatic algorithms for structure design and weight adjustment [12].

In the process of creating and evaluating the model, the data were divided into three sets: a training set, a test set, and a verification set. The training set is included in the construction of the model, and the verification set is used for the selection of neurons. The unobserved data is used to test the performance of the model using the test set. The GMDH neural network method is a hierarchical system consisting of neurons. The number of relevant neurons in each layer depends on the number of inputs [12].

To train this type of ANN, we divided the data on electricity consumption into three sets: training, testing, and verification. A model was created based on the training set. Polynomial transfer functions allowed us to take into account nonlinear relationships between input parameters: volume of consumption, time, and volume of water pumping. The validation data set was used to test the accuracy of the predictions and select the best neurons. The algorithm automatically added or removed neurons, depending on their efficiency, to ensure the optimal structure of the model.

After building a model with the optimal number of neurons, this model was used to predict the optimal amount of electrical load. This method is effective for water supply companies, as it takes into account the complex and changing relationships between factors affecting electricity consumption and allows the model to be adapted in real-time for more accurate forecasting.

Since electricity consumption in water utilities may vary based on the season or other conditions, GMDH can be set to update periodically with new data, increasing its adaptability and long-term accuracy.

#### D. Assessment of accuracy of forecasting models

The study used the MAPE and RMSE accuracy assessment metrics to evaluate the forecasting accuracy of hybrid models. Formula (4) presents the root mean square error (RMSE) formula, which defines RMSE as the standard deviation of the difference between the actual value and the predicted value of the data [13].

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{x}_i - x_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Where  $\hat{x}_i$  is the predicted volume of test data,  $x_i$  denotes the actual volume of test data, and  $n$  is the number of test data [13].

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \right| \quad (5)$$

The MAPE index (equation (5)) measures the difference between the predicted and actual values for test data. Another index used in this study for prediction algorithms is the mean absolute error (MAE), which indicates the absolute difference between the predicted and actual test data for energy consumption [13].

In this study, we focus on minimizing the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) value. The training results of the hybrid models used for forecasting power demand are inputted into the optimization model. The proposed model calculates a new prediction value by assigning weights to each algorithm and to their predictions. It also considers the intercept value and the difference between the predicted and actual data. The model then recommends the optimal MAPE index state. The MAPE optimization model is presented in [13].

### III. SIMULATION RESULTS

#### A. The result of training the GMDH model

The group data processing method (GMDH) is an effective forecasting method. This method analyzes complex relationships between variables. In the case of forecasting the amount of electricity consumption in water supply companies, this method allows for taking into account a wide range of factors that affect energy consumption, such as weather conditions, daily and seasonal fluctuations, the level of water demand, etc.

As a result of training the group data processing model, we obtained the following results: the GMDH model is built from 19 layers, each of which is trained separately. The training time of each layer varies from about 8.87 seconds (layer 0) to 20.70 seconds (layer 2), indicating the speed and efficiency of the model-building process.

From layer 1 to layer 18, the training time is stable and fluctuates between 18-21 seconds, which shows that the model is stable when adding new layers and optimizing. The RMSE model accuracy indicator indicates the average difference between the predicted and actual values. A smaller RMSE value indicates higher accuracy. The RMSE value on the test data (245.21) is lower than on the training data (379.99), which may indicate that the model generalizes the data well and is not overtrained.

A low MSE value for the test data indicates a good adaptation of the model to the new data. MAPE shows the mean absolute error as a percentage of the actual values. The values of 5.899% for the training data and 0.0529% for the test data indicate that the model predicts power consumption well. A significantly lower MAPE value on the test data may indicate that the model fits the new data very well. The result of training the GMDH model is shown in Figure 3.

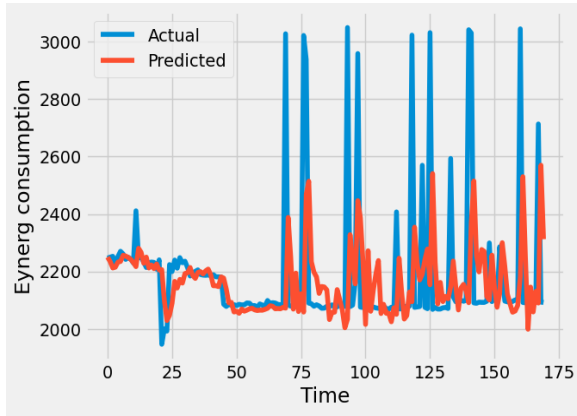


Figure 3. An example of electricity consumption by a water supply company

### B. The result of hybrid GMDH-GWO training

The GWO algorithm was used to optimize the parameters of the GMDH model, in particular the number of layers and the type of activation functions. This made it possible to automatically adjust the model, ensuring high accuracy without manual selection of parameters. The GMDH network adapted to non-linear dependencies in the data, which was very useful for forecasting complex time series such as electricity consumption. The combination with GWO made it possible to choose the best structure, ensuring the adaptability of the model to changes in the data. The result of training the GMDH-GWO hybrid model is shown in Figure 4.

By optimizing the model using GWO, the root mean square error (RMSE) and mean absolute percentage deviation (MAPE) were significantly reduced. This has provided more accurate forecasts, allowing for more efficient resource management and lower energy costs.

The combination of Grey Wolf Optimizer (GWO) and Group Method of Data Handling (GMDH) enabled automatic selection of model parameters, reducing the need for expert intervention in tuning and ensuring more efficient use of computing resources.

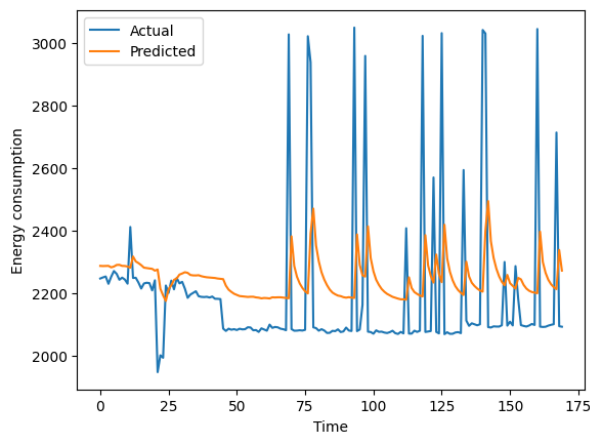


Figure 4. The result of the hybrid GMDH-GWO method simulation

Visualization of forecasts showed that the model can accurately reproduce trends and fluctuations in electricity consumption, which is critically important for

water supply companies when planning energy resources.

### C. Comparison of the obtained results and assessment of the accuracy of hybrid models

The training results of the GMDH model show that the model has better performance on the training data set than the GMDH-GWO hybrid model. In the GMDH neural network, each layer was trained for an average of about 19-20 seconds, while in the hybrid model, the training time is slightly longer. GMDH-GWO has a lower RMSE on the training set, indicating better accuracy on the training data. Similarly, the MSE of the GMDH-GWO model is lower, confirming the smaller mean error. MAPE in the GMDH-GWO network is 5.90%, in the GMDH model - 6.72%. This indicates that the batch data processing method model is more accurate during training. RMSE on the test set for both models is almost the same, with a slight advantage of the second set. This shows that both models have similar accuracy on new, unobserved data. The MSEs of both models are also close, with the second set having slightly lower values, but the difference is small.

The first set has higher accuracy and lower error rates compared to the training set, indicating its superior ability to learn patterns in the data. Both sets perform similarly on the test set, but the first set has a lower MAPE, suggesting better generalization ability. Overall, the first set is more optimal because it demonstrates superior results on both training and test data.

### D. Forecasting the optimal amount of electricity for the tasks of Vodokanals

Forecasting the optimal electrical load is important for water utilities for several reasons:

- **Economic efficiency:** Knowing when and how much electricity will be needed allows companies to optimize energy costs. This helps avoid overspending during peak loads or inefficient use of energy during periods of low demand.
- **Maintaining system stability:** Load forecasting allows for a stable water supply, as water pumping stations and other components of the water supply system require electricity to operate. This allows you to avoid emergencies and water supply failures.
- **Optimizing equipment operation:** Companies can schedule the operation of pumping stations and other equipment based on predicted load, which minimizes wear and tear and extends the life of the equipment.
- **Environmental component:** Optimizing electricity consumption helps reduce CO<sub>2</sub> emissions and other harmful emissions associated with electricity production, which is important for companies seeking to reduce their impact on the environment.
- **Backup power planning:** Load forecasting allows you to prepare for possible power

outages and properly plan the use of backup power sources, which will ensure an uninterrupted water supply.

Therefore, the forecasting of electrical load is critically important for ensuring the economic, technical, and environmental efficiency of water supply companies.

#### IV. CONCLUSION

This study investigates the importance and effectiveness of combining Grey Wolf Optimizer (GWO) and Group Method of Data Handling (GMDH) for forecasting electricity load in water supply systems. It demonstrates the practical value of these methods in enhancing the performance of such companies. GMDH constructs a model using a training dataset by applying polynomial transfer functions to the neurons, enabling the consideration of non-linear dependencies between inputs. The network structure is optimized automatically using a verification set to select the most efficient neurons in each model layer. The model is then tested on non-training data to assess its performance and accuracy.

The idea of combining GWO and GMDH to predict the optimal electrical load in water distribution problems provides the following advantages:

- **Improved Forecasting Accuracy:** The combination of Grey Wolf Optimizer (GWO) and Group Method of Data Handling (GMDH) has enabled the creation of models with high forecasting accuracy by optimizing weights and capturing nonlinear relationships. This is particularly valuable for forecasting complex and non-linear systems, like electricity consumption in water supply companies, where numerous factors such as weather conditions and consumer demand need to be considered.
- **Rapid adaptation to changes:** The use of GWO allowed GMDH parameters to be adaptively changed in case of new data or changing conditions. This made it possible to create models that quickly adapt to new circumstances and provide accurate real-time forecasting.
- **The combination of Grey Wolf Optimization (GWO) with Group Method of Data Handling (GMDH) has automated the process of finding the optimal model.** This has reduced the time and effort required for model development. As a result, more accurate forecasts can be obtained faster, leading to more effective resource management.

Hence, it is crucial to combine the Gray Wolf Optimizer with the GMDH model to enhance forecasting accuracy. GWO efficiently optimizes the parameters and structure of the GMDH, thereby reducing the risk of overtraining and ensuring the model's adaptability.

#### REFERENCES

- [1] K. Qaderi, V. Jalali, S. Etminkan, *et al.* Estimating soil hydraulic conductivity using different data-driven models of ANN, GMDH and GMDH-HS Paddy Water Environ, 16 (2018), pp.823-833.
- [2] Lawal I.A., GMDH modelling for mobile user throughput forecasting. In Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC '20). Association for Computing Machinery, 2020: 1021–1025.
- [3] Hong, T.; Shu, F. Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review. *Int. J. Forecast.* 2016, 3, 914–938. [Google Scholar] [CrossRef].
- [4] Stosov, M.A.; Radivojevic, N.; Ivanova, M. Electricity Consumption Prediction in an Electronic System Using Artificial Neural Networks. *Electronics* 2022, 11, 3506. [Google Scholar] [CrossRef].
- [5] Bouktif, S.; Fiaz, A.; Ouni, A.; Serhani, M. Multi-Sequence LSTM-RNN Deep Learning and Metaheuristics for Electric Load Forecasting. *Energies* 2020, 13, 391. [Google Scholar] [CrossRef].
- [6] Bouktif, S.; Fiaz, A.; Ouni, A.; Serhani, M. Optimal Deep Learning LSTM Model for Electric Load Forecasting using Feature Selection and Genetic Algorithm: Comparison with Machine Learning Approaches. *Energies* 2018, 7, 1636. [Google Scholar] [CrossRef].
- [7] R.B. Sowby Correlation of energy management policies with lower energy use in public water systems *J. Water Resour. Plann. Manag.*, 144 (11) (2018), Article 06018007.
- [8] Robert B. Sowby. Making waves: Research to support water and wastewater utilities in the transition to a clean-energy future. *Water Research Volume* 233, 15 April 2023, 119739 [CrossRef].
- [9] B.M. Brentan, E. Luvizotto, M. Herrera, J. Izquierdo, R. Pérez-García. Hybrid regression model for near real-time urban water demand forecasting *J. Comput. Appl. Math.*, 309 (2017), pp. 532-541.
- [10] E. Creaco A Campisano, N. Fontana, G. Marini, P. R. Page, T. Walski Real time control of water distribution networks: a state-of-the-art review *Water Res.*, 161 (2019), pp. 517-530.
- [11] Shaghghi, S.; Bonakdari, H.; Gholami, A.; Ebtehaj, I.; Zeinolabedini, M. Comparative analysis of gmdh neural network based on genetic algorithm and particle swarm optimization in stable channel design. *Appl. Math. Comput.* 2017, 313, 271–286. [Google Scholar] [CrossRef].
- [12] Hao He, Songlin Nie, Hui Ji, Xiaopeng Yan, Fanglong Yin. Wear prediction of YN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tribopair lubricated with seawater based on time-series prediction Group Method of Data Handling (GMDH) method. *Tribology International Volume* 186, August 2023, 108641.
- [13] M.Z. Zhang, C.Z. He, P. Liatsis A D-GMDH model for time series forecasting *Expert Syst Appl*, 39 (5) (2012), pp. 5711-5716.
- [14] Majid Emami Javanmard, S.F. Ghaderi. Energy demand forecasting in seven sectors by an optimization model based on machine learning algorithms. *Sustainable Cities and Society Volume* 95, August 2023, 104623
- [15] Xuetao Li, Ziwei Wang, Chengying Yang, Ayhan Bozkurt. An advanced framework for net electricity consumption prediction: Incorporating novel machine learning models and optimization algorithms. *Energy Volume* 296, 1 June 2024, 131259
- [16] M. Bouzerdoum, A. Mellit, A.M. Pavan A hybrid model (SARIMA–SVM) for short-term power forecasting of a small-scale grid-connected photovoltaic plant *Sol Energy*, 98 (2013), pp. 226-235
- [17] L. Ekonomou Greek long-term energy consumption prediction using artificial neural networks *Energy*, 35 (2010), pp. 512-517

# Enhancing Mood and Energy Detection in NLP through Fuzzy Logic Integration

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.047>

Vasyl Melnyk

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
Chernivtsi, Ukraine  
va.melnyk@chnu.edu.ua

Halyna Melnyk

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
Chernivtsi, Ukraine  
g.melnik@chnu.edu.ua

**Abstract** – This research presents a dual approach to textual analysis by utilizing fuzzy logic to detect both emotional and energy intensities in text. Through the use of trapezoidal membership functions to model diverse emotional and energy states and the application of an extensive set of fuzzy inference rules, the proposed methodology provides a nuanced, context-aware interpretation of moods and energy levels within text.

**Keywords** – Fuzzy Logic, Mood Detection, Energy Intensity, Textual Analysis, Natural Language Processing, Semantic Analysis, Linguistic Variables, Fuzzification, Fuzzy Inference Rules

## I. INTRODUCTION

The rapid development of Natural Language Processing (NLP) has transformed how we interpret human language in digital content. A key component of this progress is sentiment analysis, which seeks to identify and interpret the emotional nuances embedded in textual data. However, conventional sentiment analysis techniques often rely on binary or categorical classification, limiting their ability to capture the complexity of human emotions and energy dynamics.

This study tackles the challenge of enhancing text analysis by integrating fuzzy logic into sentiment analysis, extending the focus beyond emotions to include energy levels. Harnessing the ability of fuzzy logic to handle uncertainty and ambiguity, we aim to improve the detection of emotional and energetic intensities in text, providing a more detailed and adaptive approach compared to traditional methods [1], [2].

## II. METHODOLOGY

### A. Fuzzy Set Theory and Linguistic Variables

Our methodology employs fuzzy set theory to model both emotional and energy states with varying intensities. Linguistic variables for moods such as "Angry," "Happy," and "Sad," as well as energy levels such as "Calm," "Excited," and "Worried," are defined using fuzzy sets. This allows for a nuanced representation of emotional and energetic intensities [3].

### B. Membership Functions

The choice of triangular and trapezoidal membership functions for representing emotional and energy states is driven by several considerations:

- Trapezoidal functions are particularly effective for capturing the core intensity of states, with a flat top that allows for a range of values to have full membership. This is useful for modeling emotions and energy levels that maintain a consistent intensity over a certain range.
- Trapezoidal functions are well-suited for modeling emotions and energy states that gradually increase or decrease, reflecting the nuanced nature of human expression.
- Triangular functions provide a sharp peak at a specific intensity level, allowing for precise modeling of emotions and energy states that have a clear peak intensity. The triangular shape is beneficial for capturing rapid transitions or specific emotional spikes.
- Triangular functions are ideal for capturing sudden changes in emotional or energy intensity, providing a more dynamic response to variations in text.
- The combination of trapezoidal and triangular functions enables the system to handle both gradual and rapid transitions in emotional and energy states. This dual approach allows for a more comprehensive representation of the diverse ways human emotions and energy levels can change.

This approach is supported by linguistic research, which indicates that human expressions often involve a mix of gradual and abrupt transitions. The versatility of using both trapezoidal and triangular functions allows the system to align closely with these patterns, enhancing its ability to interpret complex emotional and energetic landscapes [3], [4], [5].

### C. Lexicon Development and Fuzzification Process

A comprehensive lexicon was developed, mapping words to mood and energy vectors based on empirical observations and linguistic studies. Each word in the lexicon is annotated with fuzzy set membership values

that quantify its association with various emotional and energy states.

### D. Fuzzification

The fuzzification process involves scanning the input text to identify terms present in the lexicon, mapping them to their corresponding fuzzy set membership values. This step converts the input text into a fuzzy representation, with each word associated with a vector of membership values across mood and energy categories.

### E. Fuzzy Inference Rules

Fuzzy inference rules interpret fuzzified text data to deduce overall emotional and energy states. These rules capture the interplay between different states, considering their intensity and combinations. The rules are expressed in an "IF-THEN" format, specifying conditions and outcomes.

### F. Example Rules

- **Mood:** IF "Angry" is "High" AND "Worried" is "High" THEN Output is "Positive."
- **Energy:** IF "Happy" is "High" AND "Excited" is "High" THEN Output is "High Positive."

These rules illustrate how combinations of mood and energy states influence the overall output.

## III. RESULTS

The application of our fuzzy logic-based methodology to mood and energy detection yielded insightful results, demonstrating significant improvements in the quality of text analysis. By integrating trapezoidal membership functions, an extensive lexicon, and comprehensive fuzzy inference rules, our system quantified the complex emotional and energetic landscape of textual data with precision.

The practical implementation of our research heavily relied on Python's powerful computational libraries, particularly NumPy for numerical operations and Scikit-Fuzzy for fuzzy logic processing.

NumPy was employed to efficiently manage array operations essential for modeling the universe of discourse for mood and energy intensity variables. It facilitated the creation and manipulation of large data structures, ensuring seamless computational performance throughout the analysis. Scikit-Fuzzy provided the necessary tools to define fuzzy variables, implement membership functions, and develop the fuzzy inference systems that serve as the foundation of our methodology. Using this library, we built sophisticated models of emotional and energetic states, capturing their subtle complexities with precision.

The experimental evaluation was carried out on a meticulously curated dataset of text samples, each labeled with emotional and energy annotations by experts. This dataset encompassed a broad spectrum of emotional expressions and energy levels, allowing for a thorough assessment of the system's effectiveness.

The dataset consisted of a thousand text samples, which were divided into a training set (70%) and a testing set (30%). Each sample was labeled with mood and energy intensities, serving as a benchmark for evaluating the system's predictions.

The initial phase of the analysis involved fuzzifying the textual data. Words identified in the text were mapped to their corresponding fuzzy set membership values based on the developed lexicon. This process transformed the input text into a multidimensional representation of mood and energy, with each word contributing to the overall emotional and energetic profile of the text.

For instance, words such as "furious" and "thrilled" were associated with high membership values in the "Angry" and "Excited" fuzzy sets, respectively, effectively capturing their intense emotional and energetic connotations.

The core of the analysis was the application of fuzzy inference rules, which synthesized the fuzzified data to deduce the overall mood and energy levels of the text. The rules were meticulously designed to account for the intensity and combination of emotions and energy states, providing a nuanced interpretation of the text's emotional and energetic tone.

In a practical application, we set input values for various moods and energy states to reflect hypothetical textual scenarios. For example, "Angry" was set to 7, indicating a high level of anger, while "Happy" was set to 3, suggesting a moderate level of happiness. Upon running the fuzzy inference system with these inputs, the system evaluated the combined effect of these states using predefined fuzzy rules and produced an output score of 2.7698. This score was interpreted within the context of our output fuzzy sets, leading to the classification of the overall mood and energy of the text as "Neutral."

The system's output demonstrates its ability to integrate diverse emotional and energetic indicators and, through the application of fuzzy logic, deduce an overall mood and energy state that reflects the nuanced interplay of these dimensions. The result underscores the system's capacity for nuanced detection in complex emotional and energetic landscapes, accurately capturing subtle shifts and interactions between different states.

The system's performance was assessed using standard metrics, including accuracy, precision, recall, and F1 score. These metrics provided a quantitative measure of the system's ability to correctly identify and quantify emotional and energetic expressions in text.

The fuzzy logic-based methodology was compared to traditional sentiment analysis models, including binary classifiers and multi-class classifiers. The results demonstrated that our approach significantly improved performance across all evaluation metrics. Specifically, the system achieved higher accuracy in detecting subtle variations in mood and energy intensities, reflected in improved precision and recall values.

Detailed Results:



## Modeling, control and information technologies – 2024

- The system achieved an accuracy of 84.1%, compared to 72.5% for traditional methods.
- The precision of the fuzzy logic-based method was 82.9%, significantly higher than the 70.1% achieved by traditional models.
- The recall metric showed a notable improvement, with the system reaching 83.8% compared to 68.9% for traditional methods.
- The F1 score, which balances precision and recall, was 83.6% for our methodology, indicating a more balanced performance across different emotional and energy states.

Graphical representations of the trapezoidal and triangular membership functions used in the system illustrated how different intensity levels were defined and interpreted. These visualizations helped demonstrate the system's capability to capture subtle gradations in emotional and energetic expressions.

Scatter plots were used to display the relationship between mood and energy intensities for various text samples (Fig.1). Each point on the plot represented the system's output for a particular text, with the x-axis representing emotional intensity and the y-axis representing energy intensity. This visualization highlighted the system's ability to discern complex patterns in text, effectively differentiating between varying emotional and energetic states.

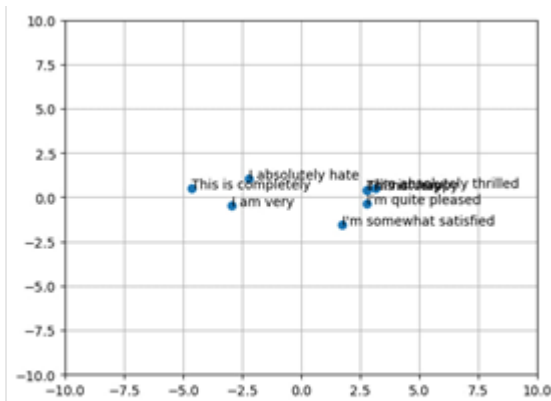


Figure 1. The relationship between mood and energy intensities for text samples

The visualizations confirmed the system's effectiveness in accurately capturing and quantifying the nuanced interplay of emotions and energy levels within text. They provided a clear and intuitive way to understand how different words and their associated intensities contributed to the overall mood and energy scores, demonstrating the potential of fuzzy logic to enhance text analysis.

### IV. DISCUSSION

The positive outcomes of our research highlight the effectiveness of fuzzy logic in capturing subtle emotional and energetic expressions that traditional sentiment analysis methods often overlook. By integrating mood and energy detection into a unified framework, our dual approach provides a comprehensive analysis that enhances user experience

on digital platforms, improves the precision of customer sentiment analysis, and supports mental health assessments through textual analysis.

The inherent flexibility of the fuzzy logic-based system allows it to manage the ambiguity and vagueness typical of human language. This adaptability is essential for accurately representing the varying intensities of mood and energy present in text.

The system's use of trapezoidal and triangular membership functions offers a robust framework for modeling both gradual and sudden changes in emotional and energetic states, effectively capturing the full range of human expression. By addressing both mood and energy dimensions, the system provides a more detailed and nuanced analysis, aligning closely with the complex nature of emotions. This dual focus enables the system to detect subtle variations in text that are often missed by binary or categorical sentiment analysis models.

However, the development of a comprehensive lexicon and the formulation of fuzzy inference rules require significant expertise and domain-specific knowledge. These processes can be labor-intensive and time-consuming, presenting challenges for scalability and efficiency. Furthermore, the system's performance depends heavily on the quality of the lexicon and the precision of the fuzzy rules. To maintain high levels of accuracy, continuous refinement is necessary, especially as language evolves and new expressions emerge.

Future research could explore several directions to further improve the fuzzy logic-based mood and energy detection system:

- Machine learning techniques, such as natural language processing (NLP) and deep learning, could be employed to automate the discovery of new words and phrases associated with emotional and energetic expressions. Unsupervised learning methods, in particular, could reduce the manual effort involved in lexicon development, ensuring the system remains up-to-date with evolving language.
- Advanced approaches, such as adaptive fuzzy systems or reinforcement learning, could be used to dynamically refine and optimize fuzzy rules based on real-time data and user feedback. This would allow the system to better adapt to changing contexts and enhance its predictive performance over time.
- Integrating contextual information, including surrounding text, metadata, or temporal patterns, could provide a more comprehensive understanding of emotional and energetic states. Context-aware analysis would increase the system's sensitivity to nuanced expressions and improve its ability to detect subtle shifts in mood and energy levels across different texts.

### V. CONCLUSION

This research demonstrates the effective application of fuzzy logic to enhance mood and energy detection in textual analysis. By utilizing trapezoidal and triangular

membership functions, a comprehensive lexicon, and carefully designed fuzzy inference rules, the system accurately captures the nuanced spectrum of human emotions and energy levels expressed in text.

The findings underscore the potential of fuzzy logic to deliver more granular, flexible, and context-aware analysis, reflecting the inherent ambiguity of human expression. The system's capacity to detect subtle variations in emotional and energetic intensities provides valuable insights for a range of applications, from enhancing user interactions on digital platforms to supporting mental health assessments through textual analysis.

Future research could focus on automating key components, such as lexicon expansion and rule refinement, to improve scalability and efficiency. Additionally, integrating context-aware analysis and exploring advanced fuzzy inference techniques could further enhance the system's adaptability and accuracy, paving the way for more intuitive and empathetic human-computer interactions.

## REFERENCES

- [1] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [2] S. Mohammad and P. Turney, "Crowdsourcing a word-emotion association lexicon," *Computational Linguistics*, 2013. URL: <https://arxiv.org/abs/1308.6297>
- [3] X. Wang, H. Zhang, and Z. Xu, "Public Sentiments Analysis Based on Fuzzy Logic for Text," *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, vol. 26, no. 9, pp. 1341–1360, 2016.
- [4] B. Cardone, F. Di Martino, and S. Senatore, "Improving the emotion-based classification by exploiting the fuzzy entropy in FCM clustering," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 36, no. 11, 2021.
- [5] O. Iparraguirre-Villanueva, V. Guevara-Ponce, F. Sierra-Lican, S. Beltozar-Clemente, and M. Cabanillas-Carbonell, "Sentiment Analysis of Tweets using Unsupervised Learning Techniques and the KMeans Algorithm," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2022, 13(6), 571-578.

# *Intelligent Employer Matching System for Young Professionals and Students Based on Multifactor Analysis*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.048>

Vitalii Pavliuk

National university of water and environmental  
engineering  
Rivne, Ukraine

Volodymyr Drevetskyi

National university of water and environmental  
engineering  
Rivne, Ukraine

**Abstract**—The article discusses the development of an intelligent employer matching system based on multifactor analysis. The system uses a career test that evaluates 40 factors, divided into four categories: career development, work environment, social and corporate benefits, and personal values and lifestyle. Machine learning algorithms account for the interconnections between attributes and provide personalized recommendations for students and young professionals. The test results are compared with employer profiles, created based on feedback from company employees. The system is planned to integrate with platforms that scrape job postings from popular websites like dou.ua, which will increase its relevance. Implementing this system will help optimize the employment process and facilitate more accurate matching of specialists to the labor market's needs.

**Keywords**—career test; machine learning; multifactor analysis; employer matching; personalized recommendations; employer profile; labor market

## I. INTRODUCTION

In today's increasingly competitive labor market, young professionals and students often face significant challenges when trying to identify employers that match their professional and personal needs [1]. One of the major issues is the lack of sufficient information or experience to make informed decisions about which companies best align with their values and career goals.

On the other hand, employers also struggle to find candidates whose priorities align with their company culture and requirements. In response to these challenges, there is growing interest in utilizing automation and data analysis technologies to improve employer matching processes.

Traditional job search platforms like LinkedIn [2] and Indeed rely on basic filters and keyword searches but fail to account for deeper individual priorities such as work-life balance, corporate culture, and growth opportunities. Similarly, while Applicant Tracking Systems (ATS) streamline the recruitment process for employers, they often focus solely on employer needs and overlook candidate-specific preferences [3]. Thus, these tools fall short in providing personalized recommendations that would meet both parties' expectations.

To bridge this gap, career tests that integrate machine learning and big data analysis offer a promising solution [4]. By combining multifactorial analysis with machine learning algorithms, these tests can evaluate candidates based on multiple factors, such as age, education, and professional interests, and provide tailored recommendations. This approach not only benefits candidates by offering personalized matches with employers but also provides employers with a clearer understanding of which candidates are the best fit for their company culture and demands.

## II. CAREER TEST DEFINITION

A career test is an evaluative tool that aims to help individuals identify careers or employers that align with their personal and professional values, strengths, and goals. By answering a series of structured questions, users receive insights into potential career paths or companies where they are likely to thrive based on the factors that are most important to them.

The career test in your system is designed to provide personalized recommendations by evaluating 40 carefully selected attributes. These attributes are divided into four key categories: Career Development, Work Environment, Social and Corporate Benefits, and Personal Values and Lifestyle. This structure is purposefully chosen to cover all major aspects that influence a candidate's decision-making process when choosing a job or an employer.

**Why This Structure?** The decision to structure the test around these four categories is rooted in both research and practical experience from the fields of human resources and career counseling. Studies show that job satisfaction is not solely dependent on salary or job title; instead, it arises from a complex interplay of various factors that fulfill both personal and professional needs. Each of these categories addresses a critical dimension of this satisfaction:

- **Career Development:** For many young professionals and students, opportunities for learning, mentorship, and career advancement are essential when evaluating potential employers. This category measures factors like availability of promotions, professional training programs, and skill-building opportunities, which are all linked to long-term job satisfaction.

- **Work Environment:** The workplace culture and conditions can significantly impact an employee's daily experience. Factors such as work-life balance, flexibility in working hours, and the physical or virtual office environment are vital for ensuring that employees feel comfortable and supported in their roles. This category ensures that employers meet these practical needs, which are highly valued by modern job seekers.

**Social and Corporate Benefits:** Beyond salary, benefits like health insurance, bonuses, and pension schemes play a crucial role in employment decisions. Research shows that candidates often prioritize comprehensive benefits packages when choosing between job offers. By including these factors, the test helps users identify employers who offer the social and financial security they desire.

- **Personal Values and Lifestyle:** Alignment between an individual's personal values and an employer's corporate culture is becoming increasingly important, particularly for younger generations who are more focused on corporate social responsibility, ethics, and work-life balance. This category assesses how well a company's mission, ethics, and culture align with the candidate's personal beliefs and lifestyle preferences.

The structure of this career test ensures that multiple dimensions of job satisfaction are covered, allowing for a holistic understanding of what makes a particular employer a good match for the candidate. By considering not just professional development and salary, but also personal values and work environment, the test provides a comprehensive picture of employer-employee compatibility.

This structured approach reflects current trends in recruitment, where both employers and employees seek matches that go beyond basic qualifications, focusing on long-term satisfaction and organizational fit.

### III. MACHINE LEARNING MODEL

The machine learning model implemented in the career test system is designed to analyze the responses provided by users and deliver personalized recommendations for employers that best match their priorities. Given the complexity of matching individuals with employers based on multiple interrelated factors, the model leverages a combination of machine learning techniques, including classification and clustering algorithms. Here are the key Components of the Model:

- **Data Preprocessing:** The first step involves cleaning and preparing the data gathered from user responses. Each response to the test's 40 attributes is converted into a structured format suitable for machine learning analysis. Normalization techniques are applied to ensure that all data points are within a consistent range, which is particularly important when different attributes have varying scales.

- **Feature Engineering:** To capture meaningful insights from the test results, the model must identify important features, or characteristics, that influence job satisfaction and employer matching. These features are derived from the four main categories: career development, work environment, social and corporate benefits, and personal values. Correlation matrices are used to explore relationships between the attributes and assess how changes in one factor may influence others.

- **Clustering Algorithm (K-Means):** The test utilizes K-Means clustering to group users and employers into distinct clusters based on their similarities. The algorithm analyzes the responses of each user and groups them with other candidates who share similar preferences. This allows for more personalized recommendations by identifying patterns in the data. For example, users who prioritize career development and mentorship opportunities will be clustered together, while those who value work-life balance and remote work options will form another group.

- **Classification Algorithm (Random Forest):** After clustering, a Random Forest classifier is employed to predict which employers are the best match for each user. This supervised learning model processes the user's input (the test results) and compares it to historical data on employers and candidates, making predictions about which employers align most closely with the user's preferences. Random Forest is particularly effective because it handles large datasets and can manage multiple input variables without overfitting. This robustness makes it ideal for the multifactorial nature of the career test.

- **Model Training and Validation:** The model is trained on historical data, which includes past user preferences and employer profiles. During training, the model is fine-tuned by adjusting hyperparameters and evaluating its performance using metrics like accuracy, precision, and recall. Cross-validation is applied to ensure that the model generalizes well and does not overfit the training data.

- **Real-Time Recommendations:** Once the model has been trained, it can generate personalized employer recommendations in real time. Users are provided with a ranked list of employers that align with their responses to the test. The model continuously learns from new data, allowing it to refine its recommendations over time.

Here are the main model advantages:

- **Scalability:** By leveraging AWS SageMaker, the system can scale to handle large datasets and multiple users simultaneously, ensuring that recommendations are generated quickly and efficiently [5].

- **Accuracy:** The use of clustering and classification algorithms ensures that the recommendations are highly personalized and relevant to each user's unique preferences.

- **Adaptability:** The model can adapt to changes in the labor market and evolving user preferences by continuously learning from new data inputs.

In conclusion, the machine learning model plays a central role in the career test system by processing multifactorial data, identifying patterns, and providing personalized employer recommendations. The combination of clustering (K-Means) and classification (Random Forest) ensures that users receive accurate and tailored results, ultimately improving the job search process for students and young professionals.

### IV. INFRASTRUCTURE

The infrastructure supporting the career test system is designed to ensure both seamless performance and scalability through modern cloud technologies. At its core, Python handles data processing, making it well-

suited for integrating machine learning algorithms. Python's powerful libraries like Pandas and Scikit-learn ensure efficient data manipulation, making it the ideal choice for this project [6].

Hosted on Amazon Web Services (AWS), the platform is designed to scale and adapt to varying loads. AWS SageMaker powers machine learning operations, enabling real-time model training, deployment, and updates, ensuring that large datasets are processed efficiently. The backend communicates with the frontend through a RESTful API, quickly converting user input into actionable recommendations. AWS Lambda, a serverless service, manages requests in real-time, optimizing performance and costs by activating only when needed.

The frontend, developed with frameworks like React.js or Angular, delivers a responsive and intuitive experience, optimized for performance across devices. With progressive web app (PWA) features, users enjoy smooth, lag-free interactions on desktops, tablets, and smartphones.

For secure and reliable data storage, Amazon RDS manages structured data such as user profiles, while Amazon S3 handles unstructured data like logs. These cloud-based solutions ensure data security, accessibility, and performance even during high traffic, while the infrastructure scales effortlessly as user engagement increases. This design ensures the system continually evolves to provide real-time, accurate recommendations while maintaining smooth front-end and back-end operations.

### CONCLUSION

The career test system developed in this project represents a significant advancement in the way young professionals and students can navigate the increasingly competitive job market. By focusing on personal and professional priorities across key categories such as career development, work environment, corporate benefits, and personal values, the system goes beyond traditional job-matching platforms. It offers users tailored recommendations that take into account the multifaceted nature of job satisfaction, helping them find employers that align with their long-term goals and values. The implementation of machine learning algorithms like clustering and classification ensures that recommendations are not only accurate but also adaptive

to user preferences. The system's real-time analysis capabilities, powered by AWS, make it scalable and efficient, allowing for continuous improvement and personalization. This results in a more intelligent and responsive job-matching experience compared to conventional methods.

Moreover, the system's integration with a previously developed tool that parses job advertisements from dou.ua enhances its practical value [7]. By pulling in real-time data on current job vacancies, the system ensures that users are matched with employers not only on the basis of cultural fit and priorities but also in terms of real, available opportunities. This synergy between the career test and the job parsing system creates a robust ecosystem for job seekers, providing them with both personalized guidance and access to up-to-date market information.

In conclusion, this career test system bridges the gap between traditional job search tools and the need for personalized, data-driven recommendations. As it continues to evolve, the system holds the potential to significantly improve the job search experience for young professionals and students, ensuring that they find positions and employers that truly match their ambitions and values.

### REFERENCES

- [1] International Labour Organization (ILO). Youth skills: tackling challenges and seizing opportunities for a brighter future of work. URL: <https://ilostat.ilo.org/blog/youth-skills-tackling-challenges-and-seizing-opportunities-for-a-brighter-future-of-work/>
- [2] Workello. How to Search for Candidates on LinkedIn. URL: <https://workello.com/how-to-search-for-candidates-on-linkedin>
- [3] Talroo. ATS Challenges: Why Applicant Tracking Systems Don't Work for Every Job. URL: <https://www.talroo.com/blog/ats-challenges/>
- [4] TraitLab. MBTI Personality Types and Career Matches. URL: <https://www.traitlab.com/blog/mbti-careers>
- [5] DataCamp. AWS SageMaker Tutorial: A Beginner's Guide. URL: <https://www.datacamp.com/tutorial/aws-sagemaker-tutorial>
- [6] Django Stars. Why Python is Good for Artificial Intelligence and Machine Learning. URL: <https://djangostars.com/blog/why-python-is-good-for-artificial-intelligence-and-machine-learning/>
- [7] Pavliuk V., Drevetskyi V. Determining job category using AWS machine learning cloud services. National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine. URL: <https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.070>



# *Kolmogorov-Arnold Neural Network's optimization and architecture analysis*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.049>

Ihor Serhienko  
igorserj2000@gmail.com

**Abstract** – This study aims to conduct an in-depth analysis of the Kolmogorov-Arnold neural network architecture and its functioning principles, comparing it with the Multi-Layer Perceptron and identifying possible optimization paths. The Kolmogorov-Arnold Network, introduced in May 2024, retains a fully connected structure but introduces trainable activation functions on the edges instead of fixed activation functions at the nodes. This allows for increased modeling accuracy and efficiency, with splines helping KAN networks learn and adapt in a controlled manner.

**Keywords** – artificial intelligence, Kolmogorov-Arnold network, neural network, multi-layer perceptron

## I. INTRODUCTION (HEADING 1)

This year, in the field of deep learning, the Kolmogorov-Arnold Network (KAN) introduced by Jiming Liu, Xuan Wang, Sachin Vaidya, and others has gained significant attention. It can be used as an alternative to the currently popular Multi-Layer Perceptron (MLP) in some cases. Inspired by the Kolmogorov-Arnold representation theorem, the authors developed KAN, which shows extraordinary potential for the future of machine learning. The new network has many advantages compared to MLP, including higher accuracy and the ability to learn from small datasets, with the drawback of slower training speed.

**Problem Statement:** Conduct an in-depth analysis of the Kolmogorov-Arnold neural network architecture and its functioning principles, including a comparison with the Multi-Layer Perceptron and identifying possible optimization paths.

**Objective:** Study the architecture of the Kolmogorov-Arnold neural network, its applications, and identify effective approaches to optimize training algorithms.

## II. ARTICLE ANALYSIS

In the article [5], the author provides brief information about the network itself and the KAN architecture. The Kolmogorov-Arnold Network is a new neural network architecture introduced in May 2024.

**Comparison of KAN with MLP [4]:** KAN retains a fully connected structure but introduces trainable activation functions on the edges instead of fixed activation functions at the nodes. In KAN, activation functions can be optimized during training, which increases modeling accuracy and efficiency. Splines help KAN networks learn and adapt in a more controlled

manner, creating smooth curves that can change locally without altering the entire shape.

The Kolmogorov-Arnold theorem explains the use of more than one hidden layer in neural networks, as noted in study [1]. The theorem shows that any continuous function can be represented by a specific network with two hidden layers. Proposed modifications to the theorem allow the smoothness properties of the function to be transferred to the outer function, which can be well approximated by ReLU networks. Instead of two hidden layers, it is more natural to interpret the theorem as a deep neural network, where most layers are needed to approximate the inner function. New versions of the theorem are easier to prove and more practical for application in deep neural networks.

Kolmogorov-Arnold Networks (KANs) represent a significant advancement in neural network design by utilizing the Kolmogorov-Arnold Representation (KAR) theorem in conjunction with B-splines, resulting in a dynamic and powerful model. The KAR theorem provides a method to break down complex functions into simpler components. KANs implement this principle at every edge within the network, transforming each connection between neurons into a learnable B-spline activation function.

Advantages from Articles [4] and [5]:

- Improved accuracy compared to MLP.
- Better model interpretability.
- Combines the strengths of splines and MLP.

- KAN can achieve better results with fewer parameters. For example, a 2-layer KAN with a width of 10 can be 100 times more accurate and efficient than a 4-layer MLP with a width of 100 [4].

Disadvantages from Articles [4] and [5]:

- KAN cannot use GPUs, making their training 10 times slower compared to MLP.

- Scaling KAN is challenging due to computational complexity and memory requirements.

In Article [3], the authors use the KAN model for time series forecasting:

- Using splines to parameterize activation functions, allowing them to learn dynamically.

- Advantage over traditional Multi-Layer Perceptron (MLP) in satellite traffic prediction tasks.

- Ensuring more accurate results with fewer parameters.

Problems arising from noise in the dataset are described in article [2]. A small amount of noise in the data significantly degrades the performance of KAN. The author proposes a data pre-filtering technique using diffusion maps and increasing the volume of training data. Using both methods (pre-filtering and data augmentation) reduces the negative impact of noise, but optimizing the filtering parameters is challenging.

Potential applications and future research directions are described in article [5]:

- Improving the efficiency of large language models.
- Enhancing the interpretability of AI systems.
- Few-shot learning.
- Improved knowledge representation and reasoning.

One possible optimization direction is adapting KAN to work on GPUs, which would significantly increase training speed. Additionally, parallel computing and specialized hardware solutions can be applied to reduce training time without losing accuracy.

### III. CONCLUSIONS

KAN is a promising architecture that can significantly improve machine learning in tasks where

interpretability and accuracy are important. However, to fully utilize its potential, issues related to slow training speed and computational resource optimization need to be addressed. Recommended approaches include implementing GPU support for KAN, using parallel computing, and introducing specialized hardware solutions to more effectively use the architecture in practical machine learning tasks.

### REFERENCES

- [1] The Kolmogorov–Arnold representation theorem revisited. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608021000289>
- [2] Hu Y. et al. KAN: Kolmogorov-Arnold Networks. arXiv. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2407.14882>.
- [3] Huang Y., Yu W., Li T. KAN: A Formal Study of Kolmogorov-Arnold Networks. arXiv. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.08790>.
- [4] Dotessec. Kolmogorov-Arnold Network (KAN): A Game Changer in the Deep Learning World? Medium. URL: <https://medium.com/@dotessec/kolmogorov-arnold-network-kan-a-game-changer-in-the-deep-learning-world-f04771989f67>.
- [5] Ahmed Z. What is the new Neural Network Architecture KAN (Kolmogorov Arnold Networks) Explained. Medium. URL: <https://medium.com/@zahmed333/what-is-the-new-neural-network-architecture-kan-kolmogorov-arnold-networks-explained-d2787b013ade>.

# *Facial Blendshapes for Custom Action: An Experimental Evaluation Using Facial Expressions for Human-Computer Interaction*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.051>

Serhii Zelinskyi

Department of Computer Engineering  
Taras Shevchenko National University of Kyiv  
Kyiv, Ukraine  
[serhii.zelinskyi@knu.ua](mailto:serhii.zelinskyi@knu.ua)

Yuriy Boyko

Department of Computer Engineering  
Taras Shevchenko National University of Kyiv  
Kyiv, Ukraine  
[boyko@univ.kiev.ua](mailto:boyko@univ.kiev.ua)

**Abstract** — This study presents a novel human-computer interaction approach that uses facial blendshapes and facial expressions to define custom actions. By using predefined facial expressions and their combinations, users can trigger custom actions in a simulated text editor. This approach can provide an accessible interaction method for individuals with upper limb disabilities and potentially offer productivity benefits for regular users. The suggested approach was implemented and evaluated by conducting an experiment involving six participants. The study compared task completion time using traditional mouse input and a combination of mouse and facial expressions. Preliminary results showed that while using facial expressions requires more time to master, participants valued the hands-free interaction potential of this approach.

**Keywords** — human-computer interaction; facial blendshapes; facial expressions; accessibility; hands-free control.

## I. INTRODUCTION

The need for more productive and accessible ways to interact with digital systems has made researchers look for new methods beyond traditional devices like keyboards and computer mice. For people with upper limb disabilities, it can be challenging to use regular input devices. This motivates finding new solutions that allow them to interact with digital systems without their hands. At the same time, regular users are looking for ways to increase their productivity, for example, by using shortcuts for tasks they frequently do.

While gesture and voice recognition systems are popular interaction methods, facial expressions offer a new, underused way to control digital systems without using hands. This study suggests using facial blendshapes [1], which recognize facial movements based on key points of the face, to define custom action. This method can give individuals with upper limb disabilities another way to interact with digital systems and help increase productivity for regular users while completing tasks.

## II. RELATED WORK

Facial expressions have become a promising modality for human-computer interaction, offering new ways of interaction with digital systems. Recent studies have explored various approaches to capturing and interpreting

facial expressions. In [2], a system using electromyography to detect muscle activity and control a virtual avatar was developed. Similarly, smart glasses equipped with optomyographic sensors were introduced to recognize facial gestures for device interaction [3]. Several studies have developed systems to simulate computer mouse behavior using face gestures [4], [5], [6]. Some of these systems combined face gestures with gaze pointing [7], while others integrated speech-to-text functionality [8].

However, systems based on predefined facial gestures are limited by the fixed number of actions they can recognize, reducing flexibility in interaction. On the other hand, facial blendshapes capture subtle variations in facial expressions, allowing for a broader space of actions to be defined.

## III. METHODOLOGY

The suggested approach has been implemented in the form of a web application. It utilizes MediaPipe Face Landmarker [9] to detect blendshape scores, which represent detailed facial deformations. These blendshapes were used to define custom facial expressions that mapped to actions in a simulated text editor. Each action is represented by either a single facial expression or a combination of two facial expressions (indicated by the “+” sign). Facial expressions and their corresponding actions are listed below:

- **Left Eye Closed** — apply the “Bold” style to the selected words.
- **Mouth Pucker** — apply the “Italic” style to the selected words.
- **Smile** — apply the “Underscore” style to the selected words.
- **Jaw Open** — apply the “Strikethrough” style to the selected words.
- **Left Eye Closed + Smile** — apply the “Highlight” style to the selected words.
- **Left Eye Closed + Mouth Pucker** — delete the selected words.
- **Left Eye Closed + Jaw Open** — select all words in the text.

Fig. 2 contains a screenshot of the experimental setup user interface.

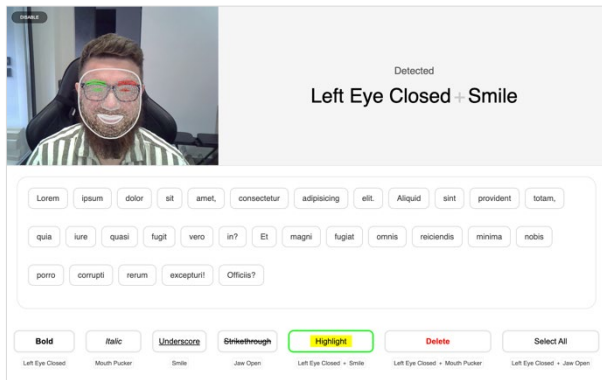


Figure 1. Screenshot of the simulated text editor interface used in the experimental setup

In the experimental setup, users could select individual words using a mouse and apply formatting, text modification, or selection actions by clicking on the corresponding buttons or using custom facial expressions.

To make applying actions using facial expressions more reliable, we designed an interaction method that requires users to hold down the “Shift” key on their keyboard while making and maintaining the facial expression. The system displays the facial expressions it recognizes in real-time and highlights the corresponding action button in the user interface. When users are confident that the system has correctly recognized the action they want to apply, they release the “Shift” key, and the corresponding action is applied to the selected words. This additional step ensures accuracy and gives users control over the action before it is executed.

This approach was implemented in the current experiment for evaluation purposes. To make the system fully hands-free, future implementations could replace the “Shift” key with a voice command or other input modalities, such as a blink or nod gesture. This would allow users, particularly those with upper limb disabilities, to interact with the system more naturally and enhance the system’s accessibility.

The blendshape scores provided by the Face Landmarker allow for real-time detection of facial movements, triggering the appropriate actions based on the defined facial expressions. This interaction method provides users with a hands-free alternative to traditional input methods while maintaining a level of control and reliability in applying the desired actions.

#### IV. EVALUATION AND RESULTS

An experiment was conducted with six participants, all of whom were regular users with no upper limb disabilities. The purpose of the experiment was to validate the suggested approach by evaluating its effectiveness in applying text formatting and text manipulation actions and comparing the results of using mouse-only input versus a combination of mouse and facial expressions input. Each participant was tasked with performing a sequence of actions, explained in the Methodology section, using both input methods. Task completion times were recorded for each participant

across both input methods. In addition, participants were asked to provide feedback on the usability and intuitiveness of the facial expression system.

The conducted experiment demonstrated the following results:

- The average task completion time using mouse-only input was **20.34 seconds**.
- The average task completion time using mouse and facial expressions was **33.45 seconds**.

Key points from the participant feedback included the following:

- **Memorization difficulty.** Most participants mentioned that they had difficulties in remembering what facial expression corresponded to each action, particularly when using combined facial expressions (e.g., Left eye closed + Smile for “Highlight”). So, they had to rely on visual hints to complete tasks accurately.
- **Suggestions for improvements.** Participants suggested enhancing the system by providing more intuitive mappings between facial expressions and actions or displaying better visual cues.
- **Hands-free interaction benefits.** Participants valued the “hands-free” interaction as an alternative to traditional input methods, especially in multitasking or when physical limitations are a factor.

Fig. 2 contains a bar chart illustrating task completion times for each participant across both input methods.

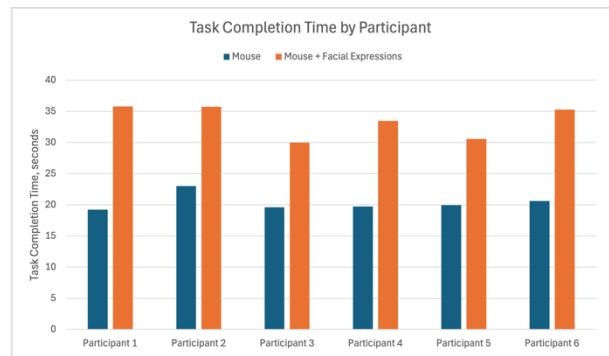


Figure 2. Task Completion Time for Mouse vs. Mouse + Facial Expressions Across Participants

#### V. DISCUSSION

This study demonstrated both strengths and challenges of using facial expressions with blendshapes for hands-free interaction. While the approach works and has clear benefits, the conducted experiment highlighted areas that need improvements.

**Advantages.** The main advantage of the system is that it offers hands-free control, which is especially useful for people with upper limb disabilities or when multitasking. By using facial blendshapes, the system is capable of recognizing small facial movements, which allows the creation of a variety of custom actions by using blendshapes related to eyes, brows, cheeks, mouth, jaw, and their combinations. This flexibility allows users to create shortcuts, which can increase their productivity.

The use of a standard web camera makes the system more accessible and low-cost.

**Disadvantages.** The primary limitation is the learning curve, as participants found it difficult to memorize facial expressions, leading to slower task completion times. The performance of the system can be affected by its sensitivity to light conditions or by using a low-quality web camera. The need to hold the “Shift” key when applying an action using facial expressions increases the system’s reliability but also adds complexity, which results in increased task completion time.

**Potential improvements.** The usability of the system can be improved with more intuitive facial expression mappings and improved real-time visual feedback when applying actions. An improved process of applying facial expression actions, instead of holding the “Shift” key, could reduce task completion time, enhancing the user’s overall performance.

**Application.** The suggested approach can offer a new way of interacting with digital systems for people with upper limb disabilities. It can also be helpful in situations where using a computer mouse or keyboard is limited, such as presentations or in industrial settings. The ability to create custom shortcuts could improve productivity in many different areas.

## VI. CONCLUSION AND FUTURE WORK

This study introduced a new way of human-computer interaction using facial blendshapes and expressions. The conducted experiment involving six participants demonstrates that while the system offers a useful hands-free interaction method and flexibility through custom facial expressions, there is a learning curve that slows down task completion, as participants took more time to complete tasks with facial expressions input than with the mouse only.

However, the participants saw the system’s potential to increase productivity, especially in situations when traditional input methods, like the keyboard or mouse, might not be practical. The ability to combine facial expressions allows for a variety of custom actions. That

makes the system flexible for different user needs, including individuals with upper limb disabilities.

Future research could explore using a facial expression sequence to define custom actions, which can significantly expand the space of possible custom actions. Also, combining facial expressions with other input modalities, like voice, gestures, head pose, body pose, or gaze (for example, for pointing), could make the system even more flexible and improve the user experience.

## REFERENCES

- [1] J. P. Lewis, K. Anjyo, T. Rhee, M. Zhang, F. Pighin, and Z. Deng, ‘Practice and Theory of Blendshape Facial Models’, 2014, *The Eurographics Association*. doi: 10.2312/EGST.20141042.
- [2] F. French *et al.*, ‘Expressive Interaction Design Using Facial Muscles as Controllers’, *Multimodal Technol. Interact.*, vol. 6, no. 9, p. 78, Sep. 2022, doi: 10.3390/mti6090078.
- [3] H. Gjoreski *et al.*, ‘OCOsense Glasses – Monitoring Facial Gestures and Expressions for Augmented Human-Computer Interaction: OCOsense Glasses for Monitoring Facial Gestures and Expressions’, *Ext. Abstr. 2023 CHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst.*, pp. 1–4, Apr. 2023, doi: 10.1145/3544549.3583918.
- [4] H. Mosquera, H. Loaiza, S. Nope, and A. Restrepo, ‘Identifying facial gestures to emulate a mouse: Control application in a web browser’, *2016 XXI Symp. Signal Process. Images Artif. Vis. STSIVA*, pp. 1–6, Aug. 2016, doi: 10.1109/STSIVA.2016.7743345.
- [5] A. Dongre, R. Pinto, A. Patkar, and M. Lopes, ‘Computer Cursor Control Using Eye and Face Gestures’, *2020 11th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. ICCCNT*, pp. 1–6, Jul. 2020, doi: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225311.
- [6] A. Kumar Raja, C. Sugandhi, G. Nymish, N. Sai Havish, and M. Rashmi, ‘Face Gesture Based Virtual Mouse Using Mediapipe’, *2023 IEEE 8th Int. Conf. Conver. Technol. I2CT*, pp. 1–6, Apr. 2023, doi: 10.1109/I2CT57861.2023.10126453.
- [7] D. Rozado, J. Niu, and M. Lochner, ‘Fast Human-Computer Interaction by Combining Gaze Pointing and Face Gestures’, *ACM Trans. Access. Comput.*, vol. 10, no. 3, pp. 1–18, Aug. 2017, doi: 10.1145/3075301.
- [8] L. R. Kalabarige, K. A. Abhilash, K. A. Trivedi, and M. Dathatreya, ‘Facial Landmark-based Cursor Control and Speech-to-Text System for Paralyzed Individuals’, *2023 Int. Conf. Sustain. Comput. Data Commun. Syst. ICSCDS*, pp. 849–856, Mar. 2023, doi: 10.1109/ICSCDS56580.2023.10104936.
- [9] ‘Face landmark detection guide’, Google AI for Developers. Accessed: Sep. 06, 2024. [Online]. Available: [https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/face\\_landmarker](https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/face_landmarker)



# Інтеграція інтернету речей та штучного інтелекту у концепції розумних міст

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.051>

Юлія Головчук

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
holovchuk\_ak22@nuwm.edu.ua

Сергій Каштан

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
s.s.kashtan@nuwm.edu.ua

*Анотація*—У роботі досліджується інтеграція інтернету речей (IoT) та штучного інтелекту (AI) у концепції розумних міст. Окремо розглянуто застосування IoT для збору даних у реальному часі та роль AI в оптимізації міських процесів, таких як управління дорожнім рухом, енергозбереження, водопостачання та контроль навколишнього середовища. Проведено аналіз проблем, пов'язаних з впровадженням цих технологій у міську інфраструктуру, включаючи питання безпеки даних, конфіденційності та етики. Також обговорюються можливості підвищення якості життя мешканців за рахунок ефективного використання IoT та AI

*Ключові слова*—*Інтернет речей (IoT); штучний інтелект (AI); інформаційні технології; комунікаційні технології; кібербезпека; моніторинг; соціальний кредит*

## I. ВСТУП

Концепція розумних міст передбачає активне впровадження технологій для покращення міських процесів, зокрема IoT та AI, які стають основними складовими цього підходу. Транснаціональна корпорація Cisco Systems, Inc. зазначає, що зростання міського населення створює потребу в інноваційних рішеннях для управління інфраструктурою, включаючи енергетичні ресурси, транспортні системи та комунальні послуги. Поєднання IoT з AI надає можливість автоматизованого управління та оптимізації міських систем, вирішуючи критичні проблеми сучасних міст, такі як затори, надмірне споживання енергії та екологічні виклики [1].

IoT забезпечує розумні міста можливістю отримувати великі обсяги даних у реальному часі з різних джерел, таких як дорожні сенсори, інтелектуальні лічильники енергії та системи моніторингу якості повітря. Ці технології використовуються для збору, аналізу та прийняття рішень у сфері міського управління. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності роботи міських служб і покращенню якості життя мешканців.

Штучний інтелект відіграє ключову роль в обробці та аналізі даних, отриманих за допомогою IoT, а також у прийнятті рішень в реальному часі. Крім того, AI допомагає прогнозувати транспортні потоки, регулювати споживання енергії та забезпечувати стабільну роботу міських мереж.

Наприклад, інтелектуальні транспортні системи (ITS) дозволяють оптимізувати маршрути громадського транспорту та зменшувати кількість заторів у містах. Зокрема, така системна інтеграція сучасних інформаційних, комунікаційних технологій та засобів автоматизації з транспортною інфраструктурою, транспортними засобами та користувачами реалізована у містах мегаполісах Нью-Йорк і Лондон.

## II. ІНТЕГРАЦІЯ IoT ТА AI ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МІСЬКИХ ПРОЦЕСІВ

Поєднання IoT та AI дозволяє значно покращити основні міські процеси [2].

1) *Транспорт*: Системи управління трафіком здатні виявляти затори в реальному часі та автоматично перенаправляти транспортні потоки.

2) *Енергетика*: Інтелектуальні лічильники та мережі допомагають регулювати споживання енергії, знижуючи витрати на електроенергію та підвищуючи ефективність.

3) *Екологічний моніторинг*: IoT-сенсори, розташовані по місту, здійснюють моніторинг рівня забруднення повітря та води, а AI аналізує ці дані для оперативного реагування на екологічні загрози.

Проте, незважаючи на численні переваги, описані процеси стикаються з низкою проблем.

1) *Безпека даних*: Одним із головних питань є забезпечення кібербезпеки зібраних даних та захист міських систем від хакерських атак. Кіберзлочинці можуть використовувати вразливості в системах IoT для атаки на міську інфраструктуру, що робить захист пріоритетним завданням.

2) *Приватність*: Збирання особистих даних мешканців міст є важливою етичною проблемою, що ставить під сумнів забезпечення їх приватності та відповідального використання отриманої інформації.

3) *Інтероперабельність*: Сумісність різних IoT-пристроїв і платформ часто створює певні труднощі. Важливо впровадити єдині стандарти, щоб забезпечити ефективну взаємодію різноманітних технологій.

III. ПРИКЛАДИ УСПІШНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ІОТ ТА АІ У РІЗНИХ МІСТАХ

Розглянемо приклади впровадження ІоТ та АІ в різних містах світу, акцентуючи увагу на перевагах, які ці технології приносять в управління міською інфраструктурою та покращення життя мешканців (див. табл. I) [3].

- Барселона: одне з перших міст, що впровадило розумні системи для управління водопостачанням і паркуванням. Завдяки використанню сенсорів та аналітики ІоТ, місто знизило витрати на воду та зменшило затори, що позитивно вплинуло на екологічну ситуацію та комфорт мешканців.
- Сінгапур: яскравий приклад застосування машинного навчання для оптимізації громадського транспорту. Інтеграція АІ дозволяє прогнозувати трафік, коригувати розклад руху транспорту в режимі реального часу та надавати пасажиром актуальну інформацію, що сприяє зменшенню заторів і покращенню якості обслуговування.
- Лондон: використовує технології ІоТ для моніторингу якості повітря та води, що дозволяє оперативно реагувати на екологічні загрози. Це є частиною загальної стратегії покращення екологічної стійкості міста.
- Нью-Йорк: завдяки інтеграції розумних лічильників для управління споживанням енергії вдалося оптимізувати енергетичні ресурси, що призвело до зменшення витрат і підвищення ефективності електромережі.
- Фенікс (штат Арізона): активно проводяться випробування автономних автомобілів. Технологія Waymo використовує АІ для навігації в міських умовах, що допомагає зменшити затори, підвищити безпеку дорожнього руху та знизити викиди парникових газів завдяки енергозберігаючим поїздкам [4].
- Торонто: проєкт Sidewalk Labs, ініційований Google, має на меті підвищення безпеки в місті за допомогою використання АІ для моніторингу та прогнозування злочинності. Хоча проєкт зазнав критики через порушення конфіденційності, він є важливим прикладом інновацій у сфері міської безпеки.
- Копенгаген: впровадження АІ для управління дорожнім рухом і боротьби з забрудненням повітря. Аналізуючи дані про транспортні засоби, пішоходів і погодні умови, місто оптимізує сигнали світлофорів, що дозволяє зменшити затори та час очікування на перехрестях, а також знижує викиди забруднюючих речовин. Додатково, місто розробляє рішення для боротьби з повеннями, щоб забезпечити стійкість до змін клімату та підвищення рівня моря.

Наведені приклади демонструють, як технології ІоТ та АІ можуть сприяти сталому розвитку міст,

підвищуючи ефективність міських процесів, екологічну стійкість та безпеку мешканців.

ТАБЛИЦЯ I. ПРИКЛАДИ ТЕХНОЛОГІЙ ІОТ У РОЗУМНИХ МІСТАХ

Технологія ІоТ	Призначення	Приклади застосування
Інтелектуальні лічильники	Контроль споживання енергії та води	Барселона: оптимізація водопостачання
Датчики дорожнього руху	Управління трафіком та паркуванням	Нью-Йорк: прогнозування заторів
Екологічні сенсори	Моніторинг забруднення повітря	Лондон: екологічний моніторинг
Системи керування освітленням	Автоматичне регулювання міського освітлення для підвищення енергоефективності	Копенгаген: управління енергією
Розумні паркувальні системи	Оптимізація паркувальних місць	Львів: автоматизована система контролю оплати паркування
Системи моніторингу якості повітря	Моніторинг забруднення повітря, сповіщення про радіаційну та хімічну небезпеку	Понад 40 міст України: мережа сенсорів EcoCity для моніторингу якості повітря
GPS-моніторинг громадського транспорту	Відстеження руху транспорту	По всій Україні: система DozoR для моніторингу громадського транспорту в режимі реального часу

IV. ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ У СОЦІАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ

Однією з наймасштабніших ініціатив у сфері моніторингу та оцінки громадян і компаній на основі їхньої поведінки є рейтингова система в Китаї, відома як *Social Credit System* (Система соціального кредиту). Це складна технологічна інфраструктура, яка поєднує можливості ІоТ, штучного інтелекту та аналізу великих даних. Система використовує інформацію з різних джерел, таких як фінансові установи, державні органи, камери спостереження, соціальні мережі та транзакції для формування цифрового профілю кожного громадянина або організації. Ця технологія має на меті заохочення «позитивної» поведінки, зокрема фінансової відповідальності, дотримання законів і етичних норм, проте викликає занепокоєння щодо конфіденційності та етичних питань [5].

Розглянемо основні характеристики системи соціального кредиту (див. табл. II).

A. Моніторинг громадян та підприємств

Система збирає дані про дії громадян та компаній, такі як сплата податків, своєчасне повернення боргів, дотримання правил дорожнього руху, поведінка в інтернеті тощо. Позитивні дії підвищують рейтинг, тоді як негативні призводять до його зниження.

B. Механізм покарань та заохочень

Високий рейтинг надає певні привілеї, такі як спрощений доступ до кредитів, знижки на

комунальні послуги, можливість отримання кращої роботи або швидше проходження бюрократичних процедур. Низький рейтинг може призвести до обмежень, таких як заборона на подорожі, обмеження доступу до закладів освіти, труднощі з отриманням кредитів або навіть публічне оголошення про порушення, що може призвести до осуду з боку суспільства.

C. Технологічна підтримка та IoT

Китай активно використовує технології IoT та AI для функціонування рейтингової системи. Мережі камер відеоспостереження з функцією розпізнавання обличчя, розумні лічильники та інші пристрої допомагають у реальному часі фіксувати поведінку громадян та підприємств, надаючи інформацію для обробки AI, який автоматизує процес прийняття рішень щодо надання певних балів або накладання санкцій.

D. Критика та виклики

Система соціального кредиту викликає значні занепокоєння щодо приватності та свободи. Критики вказують, що така система може призвести до масового контролю над громадянами, порушення їх прав на особисте життя та формування суспільства, де кожен вчинок підлягає оцінці. Проте, китайська влада запевняє, що система спрямована на зміцнення довіри в суспільстві та економіці.

ТАБЛИЦЯ II. ПРИКЛАДИ ТЕХНОЛОГІЙ IoT ТА AI У СОЦІАЛЬНОМУ КОНТРОЛІ

Технологія	Призначення	Застосування
Системи розпізнавання обличчя	Моніторинг громадян у публічних місцях	Використання в системі соціального кредиту в Китаї
Інтелектуальні камери	Автоматизований моніторинг для виявлення порушень	Виявлення правопорушень у транспортних системах
Аналітика великих даних	Обробка та аналіз даних для оцінки поведінки	Створення профілів громадян для соціального кредиту
Смарт-лічильники	Моніторинг споживання ресурсів у реальному часі	Контроль використання енергії та води
Датчики руху	Виявлення переміщення людей у певних зонах	Безпека в громадських місцях
Інтелектуальні системи спостереження	Аналіз дій людей для визначення нетипових поведінкових патернів	Виявлення кримінальних інцидентів
Платформи для аналізу соцмереж	Моніторинг громадської думки та емоцій	Аналіз відгуків громадян на політичні рішення
Сенсори для відстеження транспортних засобів	Контроль за дотриманням правил дорожнього руху	Вимірювання швидкості, моніторинг порушень
Віртуальні асистенти	Надання інформації та рекомендацій для громадян	Автоматизовані відповіді на запити з приводу законодавства

Ці технології демонструють, як IoT та AI можуть бути застосовані для соціального контролю,

підвищуючи рівень безпеки, але водночас викликають занепокоєння щодо етики та конфіденційності. Важливо знайти баланс між впровадженням інноваційних технологій і захистом прав громадян, щоб забезпечити їх безпеку без порушення приватності.

V. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Інтеграція IoT та AI в міську інфраструктуру відкриває нові можливості для ефективного управління ресурсами та покращення якості життя мешканців. IoT забезпечує збір даних у реальному часі, що дозволяє більш точно реагувати на виклики, такі як затори, енергоспоживання та екологічний моніторинг. У той же час, AI здатен аналізувати ці дані та приймати автоматизовані рішення, що сприяє більш ефективному функціонуванню міст.

Проте, ці технології несуть певні ризики. Зокрема, питання безпеки даних, захист приватності мешканців та етичні виклики. Необхідно вирішувати проблеми кібербезпеки та забезпечувати надійність систем, які використовуються. Крім того, для забезпечення сумісності різних IoT-пристроїв та платформ необхідна стандартизація, яка допоможе уникнути технічних збоїв та неузгодженостей у функціонуванні міських систем [6].

У майбутньому міста продовжать впроваджувати IoT і AI для вирішення ключових завдань міського управління, серед яких енергозбереження, ефективність транспорту та екологічна стійкість. Очікується, що майбутні розумні міста будуть краще інтегровані між собою, що сприятиме обміну даними та підвищенню ефективності міських процесів. Водночас, важливість розробки нових законодавчих та етичних стандартів залишатиметься актуальною для подальшого впровадження цих технологій.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] J. Clerk Maxwell, "Smart Cities of the Future," San Jose, CA, USA: Cisco Systems, Inc., White Paper, 2018.
- [2] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista and M. Zorzi, "Internet of Things for Smart Cities," *IEEE Internet of Things Journal*, Volume 1, Issue 1, 2014, pp. 22-32. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
- [3] M. Batty, "Artificial intelligence and smart cities," *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Volume 45, Issue 1, 2018, pp. 3-6. DOI: <https://doi.org/10.1177/2399808317751169>
- [4] Jess Brant, "The Future of AI in Smart Cities: Trends and Predictions," URL: <https://www.linkedin.com/pulse/future-ai-smart-cities-trends-predictions-jess-brant-gruke> (application date: 14.10.2024).
- [5] "Artificial Intelligence and Social Credit System in China," Ankara, Turkey: Middle East Technical University, 2021.
- [6] L. Mora, M. Deakin, Y. A. Aina, and F. P. Appio, "Smart City Development: ICT Innovation for Urban Sustainability," in *Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals: Sustainable Cities and Communities*, Cham: Springer, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71061-7\\_27-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71061-7_27-1)

# Державна політика зайнятості населення в епоху штучного інтелекту

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.052>

Марія Данильчук

Київський національний економічний університет  
імені Вадима Гетьмана  
Київ, Україна

Тетяна Королук

Київський національний економічний університет  
імені Вадима Гетьмана  
Київ, Україна

**Анотація** – У статті розглядається вплив технологій штучного інтелекту на ринок праці у розрізі світових тенденцій та української перспективи. Описано виклики, які виникатимуть, та варіанти протидії.

**Ключові слова** – ринок праці, штучний інтелект, World Economic Forum, перекваліфікація, безробіття, дефіцит робочої сили.

I. СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ: ЗБІЛЬШЕННЯ РОЗРИВУ МІЖ РОЗВИНУТИМИ КРАЇНАМИ ТА КРАЇНАМИ, ЩО РОЗВИВАЮТЬСЯ

Така рушійна сила розвитку, як, наприклад, впровадження технологій штучного інтелекту, у найближче десятиліття кардинально впливає на ринок праці: зміниться кількість і розподіл робочих місць. Деякі економіки та громади, ізольовані від можливостей створення робочих місць і перекваліфікації кадрів, зіткнуться з перенасиченими ринками праці. У інших навпаки може виникнути дефіцит кадрів, пов'язаний з проблемами з соціальною та трудовою мобільністю, сповільнюючи економічні перетворення та прогрес.

Під час Хірошимського процесу зі штучного інтелекту 1 з 7 членів G7 включив потрясіння на ринок праці, викликані штучним інтелектом, у топ 5 ризиків національним та регіональним цілям.

Згідно з даними, представленими у Future of Jobs Report 2023 від the World Economic Forum (WEF), очікується структурне зростання на 69 мільйонів робочих місць і скорочення на 83 мільйони, результатом чого є чисте скорочення на 14 мільйонів робочих місць, або 2% від поточної зайнятості (673 мільйонів робочих місць). При цьому, очікується, що кількість фахівців зі штучного інтелекту та машинного навчання зросте на 40% (1 мільйон робочих місць) до 2027 року [1].

Управління таким рівнем зменшення кількості робочих місць буде особливо складним, оскільки цей вплив буде нерівномірно розподілений між країнами. У багатьох випадках робочі місця будуть створені не в тій же локації, де вони були втрачені, чи не відповідатимуть кваліфікації працівників.

Робочі місця, пов'язані зі сферою ІТ та ІШ, ймовірно, будуть переважно зосереджені в технологічно розвинених регіонах, причиною чого є

існуючі розриви у рівні освіченості та цифрової грамотності, які не можуть бути ліквідовані без залучення інвестицій. Нижча вартість робочої сили все ще може певною мірою стимулювати офшоринг, однак протекціонізм у сфері цифрових послуг може посилитися. [1].

Наразі виробництво технологій штучного інтелекту є висококонцентрованим у єдиному, глобально інтегрованому ланцюжку поставок, який надає перевагу кільком компаніям і країнам. ASML (Нідерланди) займає 90% світового ринку літографії. Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) займає близько 56% частки світового ринку виробництва напівпровідників, за нею йде Samsung (Південна Корея) з майже 12%. Samsung є також ключовим постачальником технологій зберігання даних (DRAM і NAND, відповідно 43% і 33% світового виробництва), поряд із SK Hynix (Південна Корея). Nvidia (США) захопила 95% ринку графічних процесорів, які можна використовувати для машинного навчання [1].

Ці держави прагнуть отримати прибуткові економічні вигоди, пов'язані з цими технологіями, тоді як інші – вирішити проблему концентрації, проте очевидно, що перші намагатимуться зберегти такі вигідні їм ланцюги поставок.

До того ж, аби визначити майбутніх лідерів галузі, варто поглянути на список держав, які найбільше інвестують у цю сферу. У 2019–2023 роках уряд США інвестував у штучний інтелект найбільше порівняно з іншими країнами – майже 328 мільярдів доларів. Це приблизно на 195 мільярдів доларів більше, ніж Китай, який посів друге місце за той самий період. На третьому місці перебуває Великобританія, яка посідає третє місце (\$25,5 млрд.), що майже в 13 разів менше, ніж США [2].

Таким чином, найбільш вразливі країни та окремі спільноти в розвинених країнах і країнах, що розвиваються, можуть залишитися позаду, ізольовані від проривів штучного інтелекту, щоб цього уникнути варто працювати над залученням інвестицій, підвищенням рівня освіченості у сфері штучного інтелекту та знаходженням свого місця у ланцюгу поставок.

### II. СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ: ЗАМІНА ЛЮДЕЙ І НЕОБХІДНІСТЬ ПЕРЕКВАЛІФІКАЦІЇ

За даними експертного опитування у the Global Risks Report 2024 від the World Economic Forum, дефіцит робочої сили входить до п'ятірки найбільших ризиків для 52 країн на наступні два роки, тоді як, для порівняння, безробіття входить до п'ятірки найбільших ризиків у 30 країнах [3].

Борючись зі скороченням і старінням робочої сили, компанії в країнах з розвинутою економікою намагатимуться скористатися перевагами підвищення продуктивності, які пропонує ШІ, таким чином штучний інтелект все частіше замінюватиме працівників середньої кваліфікації, особливо в секторі послуг. Швидке впровадження цих технологій може витіснити людські компетенції за відносно короткий проміжок часу, що призведе до переходу від дефіциту талантів до неповної зайнятості та безробіття.

За останніми оцінками, три з п'яти працівників потребуватимуть навчання до 2027 року [1]. Однак бар'єри, пов'язані з соціально-економічним класом і віком, можуть перешкоджати економічній мобільності, закріплюючи існуючу нерівність як між країнами так і між працівниками всередині однієї країни. Таким чином, люди, які не мають достатніх ресурсів для постійного оновлення своїх навичок, ризикують опинитися за бортом ринку праці.

За відсутності ефективної політики, яка б заохочувала перекваліфікацію поряд із трудовою та соціальною мобільністю, доступ до можливостей заробітку звужуватиметься для дедалі більшої частини населення планети, створюючи осередки безробіття та економічних негараздів, які впливатимуть як на робітників, що займають фізичною працею, так і для «білих» комерців.

Окрім зусиль на національних рівнях, у процесі перекваліфікації кадрів задіюються також міжнародні механізми, наприклад, планується, що до 2030 року платформа Reskilling Revolution від WEF охопить понад 600 мільйонів людей у всьому світі. Співпрацюючи зі зростаючою мережею у 17 країнах, Reskilling Revolution мобілізувала багатосторонню спільноту з понад 370 організацій. Членами-засновниками є Adecco Group, Coursera, уряд Франції, iamtheCODE, Infosys, Lego Foundation, LinkedIn, ManpowerGroup, PwC, Salesforce і ЮНІСЕФ.

Таким чином, створюються мережі Skills and Education Accelerators. Мережа уже охопила такі країни, як Бангладеш, Бразилія, Туреччина, Пакистан, В'єтнам і Катар. Бразильський Skills Accelerator, наприклад, продемонстрував видатні досягнення: понад 2,2 мільйона осіб зареєструвалися на їхніх навчальних курсах. Їхній прогрес був додатково посилений завдяки стратегічній співпраці з компаніями приватного сектору через Меморандум про взаєморозуміння. Ці спільні зусилля спрямовані на синхронізацію та зміцнення платформ кваліфікації та працевлаштування [4].

### III. УКРАЇНСЬКІ РЕАЛІЇ

Ринок праці України зіткнувся з колосальними викликами, у зв'язку з повномасштабною війною: масовий виїзд молоді з країни – відтік кадрів, реінтеграція ВПО у трудову сферу, мобілізація до лав ЗСУ та ін.

Це все вилилося у те, що, згідно з дослідженням Європейської Бізнес Асоціації, станом на 2023 р. 74 % роботодавців відзначили відчутність дефіциту кадрів, 17 % – часткову нестачу кадрів і лише 7 % – не відчували дефіциту кадрів. Агенція «Info Sapiens» оцінила показник безробіття протягом I півріччя 2024 р. в межах 20,9 % – 13,1 %, а Міністерство економіки України визначило дефіцит кадрів на ринку праці у майже 30 %, тому заходи державної політики наразі спрямовуються на формування гнучкості трудової сфери та забезпечення зайнятості [5].

Для покращення ситуації було вжито ряд заходів, зокрема, у 2023 р. удосконалено механізм надання компенсацій роботодавцям за працевлаштування окремих категорій безробітних, а також працевлаштування безробітних на нові робочі місця в суб'єктах малого підприємництва. За рік за компенсаційними програмами працевлаштовано 5 тис. безробітних. У 2023 р. роботодавцям компенсовано витрати на оплату праці за працевлаштування 14 тис. внутрішньо переміщених осіб. Також у 2023 р. ухвалено позитивні рішення щодо надання мікрогрантів на заснування та розвиток бізнесу майже 10 тис. отримувачам, якими передбачено створення 20,6 тис. нових робочих місць. У рамках проекту «Робота» у квітні 2023 р. запроваджено грантову програму на створення або розвиток власного бізнесу учасникам бойових дій, особам з інвалідністю внаслідок війни та членам їх сімей. У 2023 р. ухвалено позитивні рішення щодо надання грантів 226 отримувачам, якими передбачено створення 463 нових робочих місць.

Як результат, за даними «Work.ua», станом на січень 2024 р., у порівнянні з лютим 2022 р., за кількістю пропозицій роботи ринок праці відновився на 93 %. Але відновлення відбувається нерівномірно в регіональному розрізі – найбільше зросла кількість вакансій у західних областях [6].

Незважаючи на ці виклики, які постають перед нами сьогодні, варто також дивитися у майбутнє: навчати кадри, які знали б, як працювати зі штучним інтелектом, залучати інвестиції та співпрацювати з міжнародними організаціями – оскільки саме розвиток штучного інтелекту буде однією з тих сил, яка формуватиме майбутні ринки праці.

Україна уже почала приймати перші заходи. Зокрема, у 2024 році Україна взяла участь в AI Seoul Summit та підписала спільну заяву. Крім того, у Мінцифрі прийняли дорожню карту з регулювання штучного інтелекту в Україні, яка має на меті знайти баланс між інтересам бізнесу і забезпеченням належного рівня захисту громадян від ризиків ШІ, а однією з цілей визначено підтримку конкурентоспроможності бізнесу та забезпечення доступу до глобальних ринків [7].



## Modeling, control and information technologies – 2024

### IV. ВИСНОВКИ

Штучний інтелект революціонує ринок праці, створюючи як нові можливості, так і значні виклики. Розвиток технологій призводить до автоматизації багатьох процесів, що, з одного боку, підвищує продуктивність, а з іншого – викликає ризик безробіття.

Глобальні тренди свідчать про зростаючий розрив між країнами. Розвинені країни, які активно інвестують у розвиток ІІІ, мають більше шансів отримати економічні переваги. Країни, що розвиваються, зіштовхуються з ризиком відставання, оскільки їм складніше адаптувати свої ринки праці до нових вимог.

Україна також відчуває на собі вплив цих глобальних процесів, проте війна додатково ускладнила ситуацію на ринку праці. Для того, щоб успішно подолати виклики, пов'язані з розвитком ІІІ, Україні необхідно займатися перекваліфікацією кадрів, співпрацювати з міжнародними організаціями.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Future of Jobs Report, the World Economic Forum, 2023 — Режим доступу до ресурсу: [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Future\\_of\\_Jobs\\_2023.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_2023.pdf)
- [2] AI Statistics 2024 — Режим доступу до ресурсу: <https://www.aiprm.com/ai-statistics/#ai-government-investment-statistics>
- [3] The Global Risks Report, the World Economic Forum, 2024 — Режим доступу до ресурсу: [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_The\\_Global\\_Risks\\_Report\\_2024.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2024.pdf)
- [4] Reskilling Revolution: Preparing 1 billion people for tomorrow's economy — Режим доступу до ресурсу: <https://www.weforum.org/impact/reskilling-revolution-reaching-600-million-people-by-2030/>
- [5] Основні характеристики ринку праці України у першому півріччі 2024 року, НІСД — Режим доступу до ресурсу: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/sotsialna-polityka/osnovni-kharakterystyky-rynku-pratsi-ukrayiny-u-pershomu>
- [6] Відновлення ринку праці в Україні в умовах війни: регіональні аспекти, НІСД — Режим доступу до ресурсу: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/sotsialna-polityka/vidnovlennya-rynku-pratsi-v-ukrayini-v-umovakh-viyny-rehionalni>
- [7] Дорожня карта з регулювання штучного інтелекту в Україні, Міністерство цифрової трансформації України, 2023 — Режим доступу до ресурсу: [https://cms.thedigital.gov.ua/storage/uploads/files/page/community/docs/Дорожня\\_карта\\_з\\_регулювання\\_ІІІ\\_в\\_Україні\\_compressed.pdf](https://cms.thedigital.gov.ua/storage/uploads/files/page/community/docs/Дорожня_карта_з_регулювання_ІІІ_в_Україні_compressed.pdf)

# Мобільний додаток для психологічної підтримки військових: штучний інтелект як помічник у реабілітації та адаптації

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.053>

Вікторія Рейнська  
Національний університет водного господарства та природокористування,  
м. Рівне, Україна  
[v.b.reinska@nuwm.edu.ua](mailto:v.b.reinska@nuwm.edu.ua)

Діана Лопатіна  
Національний університет водного господарства та природокористування,  
м. Рівне, Україна  
[lopatina\\_ak21@nuwm.edu.ua](mailto:lopatina_ak21@nuwm.edu.ua)

**Анотація.** У даній роботі наведено відомості про розробку інноваційного мобільного додатка психологічної підтримки для військових. Проаналізовано ключові функції додатка, серед яких можливість інтерактивного спілкування з віртуальним помічником на основі штучного інтелекту, здатного відображати реалістичне обличчя та адаптуватися до емоційного стану користувача, створюючи ефект живої присутності. Додаток також включає інтеграцію професійної психологічної підтримки через консультації з фахівцями та пропонує користувачам вправи для самопомоги, зокрема дихальні практики та управління стресом. Розглянуто аспекти анонімності та безпеки даних, що є надзвичайно важливими для комфортного користування сервісом військовими. Запропоновано рекомендації щодо покращення інтерфейсу користувача та оптимізації продуктивності додатка для створення безпечного, доступного та зручного середовища, яке сприятиме психологічній реабілітації та емоційному відновленню військових.

**Ключові слова:** мобільний додаток, віртуальний помічник професійна психологічна допомога, емоційна адаптація, ресурси для самопомоги, конфіденційність

## I. ВСТУП

Сучасний світ дедалі більше усвідомлює важливість психологічної підтримки військових, які часто стикаються з серйозними психоемоційними навантаженнями. Багато з них потребують не тільки фізичної, але й емоційної реабілітації. Мобільний додаток для психологічної підтримки з використанням штучного інтелекту надає унікальну можливість створити безпечний та комфортний простір для військових, де вони можуть знайти підтримку, поговорити з «віртуальним помічником» та отримати професійну консультацію, не виходячи з дому [1], [2].

## II. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

**Мета статті:** Мета мобільного додатка для психологічної підтримки військових полягає у

забезпеченні доступної та ефективної допомоги у сфері психічного здоров'я. Використовуючи передові технології штучного інтелекту, додаток створює безпечний простір для самовираження та підтримки, що дозволяє військовим отримувати негайну допомогу в кризових ситуаціях. Інтерактивна платформа забезпечує живе спілкування з віртуальним помічником, що адаптується до емоційних потреб користувача, і можливість звернення до професійних психологів. Додаток також пропонує ресурси для самопомоги, включаючи медитації та вправи для управління стресом. Таким чином, він сприяє покращенню загального психічного здоров'я військових, полегшуючи їхню реабілітацію та адаптацію у цивільному житті.

### Реалізація мобільного додатку

Мобільний додаток для психологічної підтримки військових буде реалізовано за допомогою кросплатформних технологій, таких як Xamarin [4] або Ionic, що дозволить створити універсальне рішення для iOS та Android з високою продуктивністю. Серверна частина буде працювати на Ruby on Rails або Flask, забезпечуючи гнучкість та швидкість розробки. Для обміну даними між клієнтом та сервером використовуватимуться GraphQL або Firebase, що дозволить оптимізувати запити та зменшити затримки у взаємодії. Дані користувачів зберігатимуться в PostgreSQL [3] або Firebase Firestore, що забезпечить швидкий доступ та високу надійність зберігання. Авторизація користувачів буде реалізована через OpenID Connect та JSON Web Tokens (JWT), що гарантує безпеку особистої інформації. Хмарні платформи, такі як Microsoft Azure або DigitalOcean, забезпечать масштабування та надійність сервісу, дозволяючи з легкістю адаптувати інфраструктуру під зростаючі потреби користувачів. Для створення інтуїтивно зрозумілого та привабливого інтерфейсу буде використано Adobe XD, що дозволить дизайнерам ефективно реалізувати візуальні концепції та покращити загальний досвід користувачів.

### Функції мобільного додатку

Ключові функції нашого мобільного додатку розроблені для забезпечення доступу до ресурсів психологічної підтримки, які відповідають потребам військовослужбовців та їх родин:

- Додаток надає можливість спілкуватися з віртуальним помічником, який здатен реагувати на емоційний стан користувача, надаючи відповідну підтримку у стресових ситуаціях.

- Користувачі можуть бронювати сесії з сертифікованими психологами через відеодзвінки або текстові консультації. Це дозволяє отримувати професійну допомогу, не виходячи з дому, що особливо важливо для військових, які можуть стикатися з труднощами у доступі до традиційних служб підтримки.

- Додаток міститиме функцію трекера настрою, яка дозволяє користувачам відслідковувати свої емоційні стани протягом дня. Це допоможе виявити тригери стресу та визначити позитивні зміни у психоемоційному стані, що може бути корисним для саморозуміння.

- Додаток пропонує широкий спектр інтерактивних вправ, включаючи медитацію, дихальні практики та навчання навичкам управління стресом. Ці модулі допоможуть користувачам покращити своє психічне здоров'я та розвинути навички саморегуляції.

- Додаток забезпечує платформу для взаємодії між користувачами, де вони можуть ділитися досвідом, підтримувати один одного та обмінюватися порадами. Це допоможе створити відчуття приналежності та зменшити ізоляцію.

- Використовуючи алгоритми машинного навчання, додаток зможе надавати персоналізовані рекомендації щодо вправ і ресурсів на основі емоційного стану та уподобань користувача. Це забезпечить більш ефективний підхід до підтримки психічного здоров'я.

Дана платформа забезпечить можливість обміну відгуками, що дозволить новим користувачам обирати найкращих фахівців на основі реальних оцінок і рекомендацій. Додаток також буде надавати інструменти для психологічного самопомоги, що допоможе спеціалістам залучити клієнтів до активної роботи над своїм ментальним здоров'ям. В результаті, додаток не тільки розширить доступ до професійної підтримки, але й створить спільноту, де користувачі можуть обмінюватися досвідом та підтримувати одне одного у складні часи.

### Монетизація

- Користувачі можуть оформити підписку на платний пакет, який надає доступ до розширених функцій, таких як індивідуальні сесії з психологами, спеціалізовані тренінги, курси самопомоги та безкоштовні вебінари. Це дозволить користувачам отримувати більше ресурсів для особистісного розвитку та покращення психологічного здоров'я.

- Додаток може встановити плату за індивідуальні або групові сесії з фахівцями.

Користувачі можуть обирати зручний час для консультацій, а фахівці отримуватимуть частину доходу за надані послуги.

- Платформа може співпрацювати з організаціями, що займаються психологічним здоров'ям, фітнесом або медитацією, і розміщувати їх рекламу. Партнерські програми з іншими сервісами також можуть забезпечити додатковий дохід.

- Можуть бути надані пропозиції користувачам щодо платного доступу до медитацій, афірмаций, аудіо- та відеокурсів, що допоможуть у подоланні стресу та покращенні психоемоційного стану.

- Психологи та психотерапевти можуть підписуватися на платний пакет, що надає їм доступ до аналітики, можливостей для просування своїх послуг та ексклюзивних навчальних матеріалів.

### 4) Розвиток мобільного додатку

Розвиток мобільного додатку для психологічної допомоги є багатограним процесом, що потребує стратегічного підходу. Першим етапом є дослідження ринку для вивчення потреб потенційних користувачів та аналізу конкурентів [5]. Далі важливо розробити концепцію і дизайн, зосереджуючись на інтуїтивно зрозумілому інтерфейсі для комфортного використання. Вибір технологій, таких як Flutter або React Native, дозволяє забезпечити кросплатформність, тоді як серверна частина з базою даних і API забезпечує функціональність. Ключовими функціями є доступ до консультацій, тренінгів, а також можливість залишати відгуки про фахівців. Тестування додатку з реальними користувачами допоможе виявити недоліки і внести корективи перед запуском. Після цього важливо реалізувати ефективну маркетингову стратегію для залучення цільової аудиторії [6]. Після запуску слід постійно моніторити відгуки користувачів та вдосконалювати додаток, щоб підтримувати високі стандарти якості. У майбутньому можливе розширення функціоналу, включаючи інтеграцію штучного інтелекту для персоналізації рекомендацій [7]. Комплексний підхід до розвитку додатку дозволить створити ефективний інструмент для підтримки психоемоційного здоров'я користувачів.

### III. ВИСНОВКИ

Новий мобільний додаток для психологічної підтримки військових поєднує інновації у сфері штучного інтелекту та психології, створюючи унікальний інструмент для підтримки тих, хто захищає нашу країну. Завдяки можливостям "живого" спілкування та кваліфікованій допомозі професіоналів, цей додаток може стати потужною підтримкою для військових, сприяючи їхній психологічній реабілітації та зміцненню емоційної стійкості.

## Modeling, control and information technologies – 2024

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] American Psychological Association. (2019). Guidelines for the Practice of Telepsychology. Retrieved from <https://www.apa.org/practice/guidelines/telepsychology> (дата звернення: 12.10.2024)
- [2] Behance. (n.d.). Psychology app projects. Retrieved from <https://www.behance.net/search/projects/psychology%20app>
- [3] PostgreSQL Global Development Group. (n.d.). PostgreSQL: The world's most advanced open source relational database. Retrieved from <https://www.postgresql.org/docs/>
- [4] Xamarin. (n.d.). Xamarin Documentation. Retrieved from <https://docs.microsoft.com/en-us/xamarin/>
- [5] Kauffman, R. J., & Walden, E. (2018). Market Research: An Essential Step in the New Product Development Process. Retrieved from <https://www.entrepreneur.com/article/290828>
- [6] Burch, A. (2021). Mobile App Marketing: The Complete Guide. Retrieved from <https://www.apptamin.com/blog/mobile-app-marketing-guide/>
- [7] Lavalle, S., & Lesser, E. (2020). Artificial Intelligence and the Future of Work. Retrieved from <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2020/02/05/artificial-intelligence-and-the-future-of-work/?sh=69b4e7b13204>

# Прогнозування коефіцієнту проникнення метаматеріалу за його структурою та параметрами електромагнітного опромінення

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.054>

Олександр Трофимчук

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України  
Київ, Україна  
trofymchuk@nas.gov.us

Дмитро Корольок

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
Київ, Україна  
dimitri.koroliouk@ukr.net

Павло Крисенко

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України  
Київ, Україна  
p.krysenko@gmail.com

**Анотація** – В цій роботі представлено архітектуру штучної нейронної мережі для прогнозування коефіцієнту пропускання метаматеріалу за його структурною інформацією та параметрами електромагнітного випромінювання. Також представлено метод кодування просторової інформації про склад метаматеріалу.

**Ключові слова** – штучна нейронна мережа; згортоква нейронна мережа; метаматеріал; коефіцієнт пропускання; машинне навчання; глибоке навчання; прогнозування; діелектричні матеріали

## I. ВСТУП

У сучасному світі існує нагальна потреба у матеріалах, що мають надзвичайні характеристики. Такими матеріалами можуть виступити метаматеріали. Їх властивості залежать від топологічної періодичної структури. Для різних видів хвиль, а саме електромагнітних, акустичних та інших існують різні метаматеріальні моделі [1,2]. Проблема використання цих моделей в тому, що розв'язок їх ускладнюється разом з ускладненням топологічної структури метаматеріалу. В даний час не існує універсальних методів для прогнозування коефіцієнтів пропускання, відбивання та поглинання метаматеріалів за їх структурою. Тому існує потреба у розробці універсального та спрощеного методу, який буде брати до уваги як структурну інформацію про склад метаматеріалу, так і про параметри електромагнітного опромінення.

З розвитком обчислювальної техніки та розробкою нових підходів у глибокому навчанні були зроблені спроби обробки структурної

інформації метаматеріалів за допомогою методів глибокого навчання. Але, ці методи використовують спрощену та неповну інформацію про топологію, таку як використання послідовної обробки двовимірної структури та інші [3-5].

## II. ПРЕДСТАВЛЕННЯ ВХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Для кодування однозначної інформації про матеріали, з якого складається метаматеріал було запропоновано використання діелектричної проникності, магнітної провідності та питомої провідності, як значень, що характеризують матеріал. Тобто, топологічна інформація кодується як чотирирівимірний тензор з трьома каналами значень діелектричної проникності, магнітної провідності та питомої провідності.

$$X = (x, y, z, n). \quad (1)$$

Де  $X$  – вхідний тензор,  $x, y, z$  – координати відповідних осей,  $n$  – канал з характеристиками.

Таким чином, вхідний тензор можна представити як тривимірне зображення з RGB каналами, де замість значень інтенсивності кольору знаходяться характеристики матеріалів у кожній точці  $(x, y, z)$ .

Також, потребує кодування інформація про параметри електромагнітного опромінення. З експериментів були взяті такі значення, як показник заломлення підкладки, кут опромінення, взаємна чи кросс поляризована електромагнітна хвиля. Значення заломлення та кута опромінення були масштабовані за допомогою MinMax масштабювання, інформація про кросс або взаємну



поляризацію було закодовано як 0 взємної поляризації, та 1 для кросс.

$$c = [\rho, \alpha, \eta]. \quad (1)$$

Де  $c$  – вектор параметрів електромагнітного опромінення,  $\alpha$  – кут опромінення,  $\eta$  – коефіцієнт заломлення діелектрику.

### III. НАВЧАННЯ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖИ

А) Для обробки структурної інформації було обрано за основу для архітектури тривимірну згорткову нейронну мережу. Із-за незначної кількості даних було обрано LeNet[6] подібну архітектуру, де замість двовимірної згортки було використано тривимірну.

Б) Також для обробки вектора параметрів електромагнітного опромінення була додана додаткова нейронна мережа яка представляє тривимірний вектор як вектор  $n$  внутрішнього представлення.

В) Третій блок нейронної мережі являє собою декілька шарів повнозв'язної нейронної мережі, яка на вхід приймає об'єднаний вектор представлення структурної інформації та векторне представлення параметрів електромагнітного опромінення.

Схематичне зображення такої архітектури представлено на рис.1 з підписаними блоками А, Б, В.

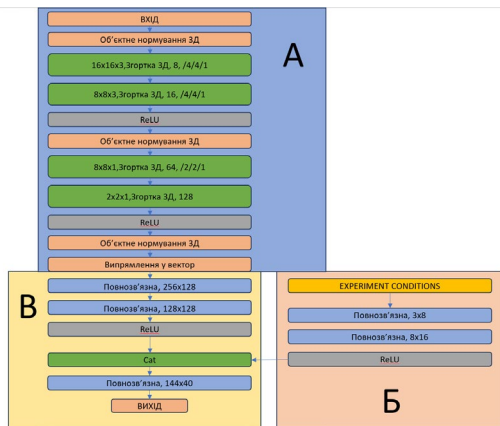


Рис. 1. Архітектура для прогнозування коефіцієнту пропускання діелектрику

Коефіцієнт пропускання представлений у вигляді набору із 20 значення для обраних частот із проміжку, що був досліджений. Для цього навчання були обрані дані про електромагнітні властивості метаматеріалів для частотного проміжку від 136 до 371 ГГц. Тобто, із цього проміжку було обрано 20 значень коефіцієнту пропускання для 20 частот.

Із-за малої кількості даних було створено таку вибірку для навчання та тестування.

ТАБЛИЦЯ 1. Тренувальна вибірка

Тренування	Валідація
12	2

Під час навчання було отримано такий графік значень функції помилки. Цей графік представлений на рис. 2

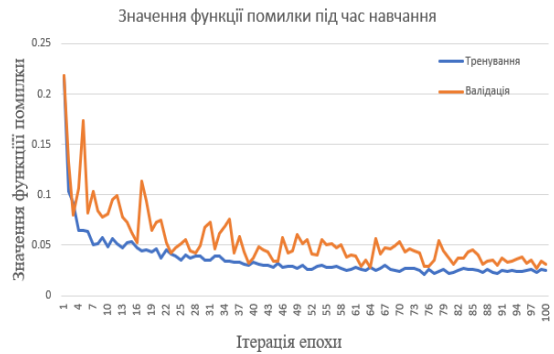


Рис. 2 Графік значень функції помилки

З графіку на рис. 2 видно нестабільні значення функції помилки для валідаційної вибірки. Це може бути зумовлено малою кількістю даних та великими значення параметру Dropout.

Для валідаційного метаматеріалу було спрогнозовано таку залежність коефіцієнту пропускання від частоти [7].

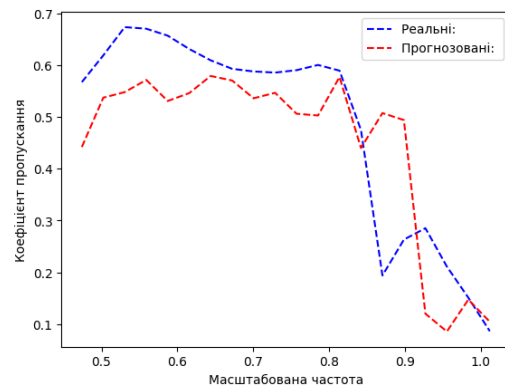


Рис. 3 Спрогнозовані та реальні значення коефіцієнту пропускання для метаматеріалу 2

З графіку залежності на рис. 3 можна легко сказати, що метаматеріал являє собою фільтр нижніх частот.

### IV. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Із-за малої кількості даних прогнозовані значення не можливо використовувати як опорні значення для розрахунків та моделювання. Але, не зважаючи на таку малу кількість зібраних семплів, нейронна мережа змогла вивчити внутрішні залежності метаматеріалу, обробити вектор параметрів електромагнітного опромінення та спрогнозувати загальний вид залежності коефіцієнту пропускання від частоти, за яким можна побачити характер застосування цього метаматеріалу.

Також, навчання було проведено для доволі вузького діапазону опромінення. Це обмеження теоретично може бути виправлено тим, що інформація про частоту опромінення буде також

використана як вхідна інформація. Це можна зробити за допомогою сучасних архітектур, які мають механізм перекресної та власної уваги.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] [1] Lopez, Maël & Dupont, Thomas & Panneton, R.. (2023). A mass-spring analogy for modeling the acoustic behaviour of a metamaterial. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. 265. 6295-6301. 10.3397/IN\_2022\_0935.J. Clerk Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism," 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.
- [2] Porfyrakis, Polykarpos & Tsitsas, Nikolaos. (2019). Nonlinear electromagnetic metamaterials: Aspects on mathematical modeling and physical phenomena. Microelectronic Engineering. 216. 111028. 10.1016/j.mee.2019.111028.K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
- [3] F. Demore, G. Rizzi, M. Collet, P. Neff and A. Madeo, "Unfolding engineering metamaterials design: Relaxed micromorphic modeling of large-scale acoustic meta-structures," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 168, no. 104995, Nov. 2022. doi:10.1016/j.jmps.2022.104995.
- [4] L. Yanglong and W. Yan, "Structural optimization of metamaterials based on periodic surface modeling," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 395, no. 115057, May 2022. doi:10.1016/j.cma.2022.115057.
- [5] W. Pabst, S. Hříbalová and T. Uhlířová. "Quasi-laminate and quasi-columnate modeling of dielectric and piezoelectric properties of cubic-cell metamaterials," Journal of the European Ceramic Society, vol. 42, no. 3, pp. 1396-1406, Apr. 2022. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2021.12.013.
- [6] Lecun, Y.; Bottou, L.; Bengio, Y.; Haffner, P. (1998). "Gradient-based learning applied to document recognition" Proceedings of the IEEE. 86 (11): 2278–2324. doi:10.1109/5.726791. S2CID 14542261
- [7] P. I. Krysenko, M. O. Zoziuk "Using Information about Experimental Conditions to Predict Properties of Metamaterials," Microsystems, Electronics and Acoustics, vol. 28, no. 3, 2023, pp. 287808.1-287808.7, Dec. 2023. doi: 10.20535/2523-4455.mea.287808



***СЕКЦІЯ 5***  
***КІБЕРНЕТИЧНА ТА ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКА***

# *Paradigm shifts in cybersecurity: a convergence of artificial intelligence, quantum computing, and neuromorphic systems*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.055>

Yurii Lypka  
National University of Water and Environmental Engineering,  
Rivne, Ukraine  
[yu.i.lypka@nuwm.edu.ua](mailto:yu.i.lypka@nuwm.edu.ua)

The convergence of artificial intelligence (AI), quantum computing, and neuromorphic systems represents a significant paradigm shift in the field of cybersecurity. This transformation is driven by the increasing complexity of cyber threats and the need for more sophisticated defense mechanisms. As cyber threats evolve, traditional security measures are often inadequate, necessitating the integration of advanced technologies such as AI and quantum computing to enhance cybersecurity frameworks.

AI has emerged as a crucial component in modern cybersecurity strategies. Its ability to analyze vast amounts of data and identify patterns enables organizations to detect and respond to threats more effectively. For instance, the application of machine learning algorithms allows for the identification of anomalous behavior within networks, which is essential for early threat detection and mitigation (Komarudin et al., 2023; Sarker, 2023). The integration of AI into cybersecurity not only improves the accuracy of threat detection but also enhances the overall resilience of systems against cyber-attacks. As noted by Sarker et al., AI-driven cybersecurity solutions leverage various methodologies, including deep learning and natural language processing, to address the multifaceted challenges posed by cyber threats (Sarker et al., 2021).

Moreover, the role of AI in cybersecurity extends beyond mere detection. It also encompasses predictive analytics, where AI systems can forecast potential threats based on historical data and emerging trends. This proactive approach is vital in a landscape where cyber threats are becoming increasingly sophisticated and frequent. The effectiveness of AI in this domain is underscored by its ability to adapt and learn from new data, thereby continuously improving its threat detection capabilities (Zohuri, 2024; Abdullahi et al., 2022). Additionally, the integration of AI with cloud security frameworks has proven beneficial, as it allows for real-time monitoring and analysis of user behavior, further enhancing threat detection and response mechanisms (Olabanji, 2024).

On the other hand, quantum computing presents both challenges and opportunities for cybersecurity. The computational power of quantum computers enables them to solve complex problems at unprecedented speeds, which could potentially undermine current cryptographic standards ("The

Impact of Quantum Computing on Cybersecurity", 2023; Sodiya, 2024). Traditional encryption methods, which rely on the difficulty of certain mathematical problems, may become obsolete in the face of quantum attacks. This reality has prompted researchers to explore quantum-resistant cryptographic solutions, such as Quantum Key Distribution (QKD) and Post-Quantum Cryptography (PQC), which aim to secure communications against the capabilities of quantum computing (Sodiya, 2024; Dash, 2024). The urgency of developing these solutions is emphasized by the potential vulnerabilities that quantum technologies introduce to existing cybersecurity frameworks (Raheman, 2024).

The intersection of AI and quantum computing further complicates the cybersecurity landscape. AI methodologies can enhance quantum cryptographic systems, making them more efficient and robust against attacks (Radanliev, 2024; Dash, 2024). For instance, AI can optimize the processes involved in QKD, ensuring that secure keys are generated and distributed effectively. However, the fusion of these technologies also raises concerns regarding the potential risks they pose to information security. As Raheman discusses, the integration of AI with quantum computing could lead to new vulnerabilities that need to be addressed through innovative cybersecurity strategies (Raheman, 2024).

Neuromorphic computing, which mimics the neural structure of the human brain, is another emerging technology that holds promise for enhancing cybersecurity. By processing information in a manner similar to biological systems, neuromorphic systems can potentially improve the efficiency and effectiveness of threat detection and response mechanisms (Zohuri, 2024; Charmet et al., 2022). These systems can learn from their environment and adapt to new threats in real-time, making them a valuable asset in the fight against cybercrime. The ability of neuromorphic systems to process information in parallel allows for faster decision-making, which is critical in mitigating the impact of cyber-attacks (ALmojel, 2024).

The convergence of AI, quantum computing, and neuromorphic systems is not without its challenges. The complexity of integrating these technologies requires a comprehensive understanding of their individual capabilities and limitations. Furthermore,

ethical considerations surrounding the use of AI in cybersecurity must be addressed, particularly regarding issues of privacy and data protection (Stevens, 2020; Charmet et al., 2022). As the cybersecurity landscape continues to evolve, it is imperative for researchers and practitioners to collaborate in developing frameworks that leverage the strengths of these technologies while mitigating their risks.

In conclusion, the paradigm shift in cybersecurity driven by the convergence of AI, quantum computing, and neuromorphic systems presents both opportunities and challenges. The integration of these advanced technologies is essential for developing robust cybersecurity measures capable of addressing the increasingly sophisticated nature of cyber threats. As organizations navigate this complex landscape, the importance of ongoing research and collaboration cannot be overstated. By harnessing the potential of AI, quantum computing, and neuromorphic systems, the cybersecurity community can enhance its resilience against emerging threats and safeguard critical digital assets.

## REFERENCES

- [1] Emmanni, P. (2023). The impact of quantum computing on cybersecurity. *Journal of Mathematical & Computer Applications*, 2(2), 1-4. [https://doi.org/10.47363/jmca/2023\(2\)140](https://doi.org/10.47363/jmca/2023(2)140)
- [2] ALmojel, F. (2024). Advancing hospital cybersecurity through iot-enabled neural network for human behavior analysis and anomaly detection. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(5). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2024.0150506>
- [3] Abdullahi, M., Baashar, Y., Alhussian, H., Alwadain, A., Aziz, N., Capretz, L., ... & Abdulkadir, S. (2022). Detecting cybersecurity attacks in internet of things using artificial intelligence methods: a systematic literature review. *Electronics*, 11(2), 198. <https://doi.org/10.3390/electronics11020198>
- [4] Charmet, F., Tanuwidjaja, H., Ayoubi, S., Gimenez, P., Han, Y., Jmila, H., ... & Jiang, X. (2022). Explainable artificial intelligence for cybersecurity: a literature survey. *Annals of Telecommunications - Annales Des Télécommunications*, 77(11-12), 789-812. <https://doi.org/10.1007/s12243-022-00926-7>
- [5] Dash, B. (2024). Quantum-safe: cybersecurity in the age of quantum-powered ai. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1), 1555-1563. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.2640>
- [6] Komarudin, K., Maulani, I., Herdianto, T., Laksana, M., & Syawaludin, D. (2023). Exploring the effectiveness of artificial intelligence in detecting malware and improving cybersecurity in computer networks. *Eduvest - Journal of Universal Studies*, 3(4), 836-841. <https://doi.org/10.59188/eduvest.v3i4.793>
- [7] Olabanji, S. (2024). Ai-driven cloud security: examining the impact of user behavior analysis on threat detection. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 17(3), 57-74. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2024/v17i3424>
- [8] Radanliev, P. (2024). Artificial intelligence and quantum cryptography. *Journal of Analytical Science & Technology*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s40543-024-00416-6>
- [9] Raheman, F. (2024). From standard policy-based zero trust to absolute zero trust (azt): a quantum leap to q-day security. *Journal of Computer and Communications*, 12(03), 252-282. <https://doi.org/10.4236/jcc.2024.123016>
- [10] Raheman, F. (2024). Tackling the existential threats from quantum computers and ai. *Intelligent Information Management*, 16(03), 121-146. <https://doi.org/10.4236/iim.2024.163008>
- [11] Sarker, I. (2023). Multi-aspects ai-based modeling and adversarial learning for cybersecurity intelligence and robustness: a comprehensive overview. *Security and Privacy*, 6(5). <https://doi.org/10.1002/spy2.295>
- [12] Sarker, I., Furhad, H., & Nowrozy, R. (2021). Ai-driven cybersecurity: an overview, security intelligence modeling and research directions. *Sn Computer Science*, 2(3). <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00557-0>
- [13] Sodiya, E. (2024). Quantum computing and its potential impact on u.s. cybersecurity: a review: scrutinizing the challenges and opportunities presented by quantum technologies in safeguarding digital assets. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 18(2), 049-064. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2024.18.2.0026>
- [14] Stevens, T. (2020). Knowledge in the grey zone: ai and cybersecurity. *Digital War*, 1(1-3), 164-170. <https://doi.org/10.1057/s42984-020-00007-w>
- [15] Zohuri, B. (2024). Ai revolution: safeguarding tomorrow's frontiers - transforming cybersecurity across industries (a short approach). *Current Trends in Eng Sc*, 4(2), 1-4. <https://doi.org/10.54026/ctes/1057>



# *A Novel Approach to Cybersecurity Threats Classification by its Nature*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.056>

Alla Pinchuk

Department of Telecommunication and  
Radio Electronic Systems  
National Aviation University  
Kyiv, Ukraine  
alla.pinchuk@nau.edu.ua

Oleh Polihenko

Department of Telecommunication and  
Radio Electronic Systems  
National Aviation University  
Kyiv, Ukraine  
o.polihenko@ukr.net

Roman Odarchenko

Faculty of Air Navigation, Electronics and Telecommunications  
National Aviation University  
Kyiv, Ukraine  
odarchenko.r.s@ukr.net

**Abstract** – A comprehensive and precise classification framework is vital for understanding and categorizing cyber threats in the rapidly evolving cybersecurity landscape. Many existing classification models fail to adequately address the diverse and dynamic nature of modern threats. This paper proposes a refined approach to classification, focusing on the nature of cyber threats to provide a more accurate and detailed understanding.

**Keywords** – cyber threats, classification approach, cyber threat nature

## I. INTRODUCTION

Cybersecurity threat nature includes diverse traits, such as the origin, behavior, and motivation of each threat. To the threat nature aspect, the organization can measure how well it can defend itself against such a threat, predict its behavior, and weigh the risk it poses out of which they will design a better defense mechanism. Traditional methods of threat classification mostly rely on a few aspects, which are not capable of catching up with the more sophisticated and adaptive attacks. The requirement to classify threats in a new way can hardly be overlooked nowadays with cyber-attackers that are getting increasingly smarter through the usage of artificial intelligence (AI), and machine learning (ML) techniques to effectively bypass traditional detection systems. This paper examines a new classification of cybersecurity threats that are based on their nature to give a more flexible and dynamic comprehension of modern cyber threats.

## II. PROBLEM STATEMENT

Existing cybersecurity threats classifications don't consider threats' nature with enough granularity which makes it ineffective nowadays. Usually, it covered just a few aspects of cyber threat nature. Thus, to achieve the goal of this paper, the next research tasks should be solved:

- analyzing the possible cyber threat nature;
- identifying gaps in existing classifications;
- a classification approach development.

## III. ANALYZING OF THE POSSIBLE CYBER THREAT NATURE

First of all, cyber threats can have an insider or outsider nature. Insider threats originate from individuals within the organization, such as employees or contractors, while outsider threats come from external actors like cybercriminals or nation-state hackers. Understanding the distinction between these two types is critical for developing tailored security measures. In [1] discussed possible insider threats.

Also, cyber threats nature can be intentional (deliberate actions) or accidental. The categorization of these two types is of prime importance because the plan for handling and decreasing the risks that come with each depends on the same. On purpose, threats often are to be faced with defense practices that involve information like advanced threat detection systems, and real-time monitoring, while accidental threats need to be controlled by regular audits, security training, and policy enforcement to minimize the threats.

Regarding intentional cyber threats, the special report of the Horizon 2020 project highlighted the next: foreign agents, industrial or economic espionage, terrorists, organized crime, insiders, hackers and crackers, political dissidents, vendors, and suppliers [2]. This also lies in the concept of hybrid threats, as described in [3]. It is mentioned that modern cybersecurity threats have a hybrid nature in diplomacy, sabotage and espionage efforts, propaganda, and arms race.

Existing cybersecurity threats can also be defined as technical or non-technical. These threats are discussed in detail in [4-5].

It is also worth to mention AI-driven cyber threats. Nowadays, cyber-attacks become more complicated with AI technologies that describe their evolving nature.

IV. GAPS IN EXISTING CLASSIFICATIONS

As all existing cybersecurity threat classifications can be divided into two categories, based on attack techniques and impact, the last one does not consider cyber threats' nature at all.

In [6], the authors proposed a C<sup>3</sup> model for classifying cyber threats. This model considers two types of threat sources (nature), insiders and outsiders. The authors mentioned that it is possible to develop different subcategories, but an initial version is limited by these two types.

Another existing classification model is the Three orthogonal dimensional model, proposed in [7]. Here, the authors highlighted threat actors' motivation and agents on their own separately. They described motivation as accidental and deliberate, while threat actors (agents) can be human, technological, and “force majeure”.

The pyramidal model [8] highlighted cyber threats nature as cybercriminal's prior knowledge of the system without any further subcategories.

The more detailed classification by cyber threat nature is proposed in [9]. Here authors move with more granularity by adding more layers to classification:

- ↓ external/internal threat;
- ↓ human/environmental/technological threat;
- ↓ malicious/non-malicious threat;
- ↓ accidental/intentional threat.

However, even the last model fails to encompass all aspects of modern cyber threats nature, especially those posed by AI-driven threats. Given the evolving nature and complexity of contemporary cyber threats, there is a pressing need to develop a more precise and granular classification model that can better accommodate new challenges, including the rise of AI-enhanced attacks.

V. PROPOSED APPROACH

Based on a deep analysis of possible cybersecurity threats nature and existing approaches to classifying by threats nature, we are considering the next main categories: threat actor nature, constantly and rapidly evolving cyber threat nature, threat covert nature, and technical/non-technical threats (Fig.1). Each of them also has subcategories that allow us to classify threats more accurately, except a covert nature.

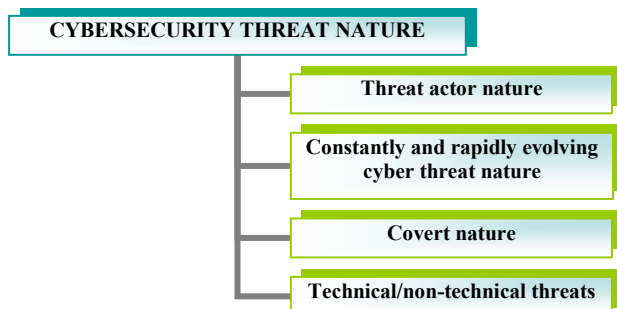


Figure 1. The proposed approach to the classification of cyber threats' nature

A. Threat actor nature

This section aims to subcategorize threat actor nature more granular. First of all, the threat actor can be an *insider* or *outsider* threat. Let's dive deeply into insider threats. Based on [1, 10-11], insiders can be *unintentional (accidental)* and *intentional (deliberate)*. For the first one, it is possible to include the following:

- *negligent insiders*: an insider who has no malicious intent behind their deliberate inactivity, but caused or raised the possibility of possible future harm to the company's information systems through passive-risk behavior;
- *accidental insiders*: an insider who has no malicious intent behind their deliberate inactivity, but due to a lapse makes an error that caused or raises the possibility of possible future harm to the company's information systems;
- *third-party insider*: a business partner or contractor who has no malicious intent behind their deliberate inactivity, but caused or raised the possibility of possible future harm to the company's information systems through passive-risk behavior or due to a lapse makes an error [11].

The intentional nature can be characterized by the following aspects:

- *malicious insider*: an insider who has malicious intent behind their deliberate inactivity and caused or raised the possibility of possible future harm to the company's information systems;
- *insider collusion*: a type of malicious insider, in which one or more insider threat individuals work with an external partner to compromise their organization. Collusive insider threats often involve a cybercriminal recruiting an employee to steal intellectual property on their behalf for financial gain [11];
- *disgruntled employee*: a malicious insider who may commit deliberate sabotage of security tools, data security controls, or commit intellectual property theft [12];
- *third-party threats*: a business partner or contractor who has malicious intent behind their deliberate inactivity and caused or raised the possibility of possible future harm to the company's information systems [11].

Regarding outsider threats, the first layer of classification is also intentional and unintentional threats. The intentional threats can be as the following:

- *criminal groups*: organized entities involved in illegal activities, such as financial fraud, data theft, or ransomware attacks, often motivated by financial gain;
- *hackers and crackers*: individuals or groups with advanced technical skills who exploit vulnerabilities in systems; hackers may operate with or without malicious intent, while crackers specifically focus on breaking into systems for personal gain or to cause harm;

## Modeling, control and information technologies – 2024

- *terrorist organizations*: actors who act to spread fear and desire social or political change;
- *nation-states*: refers to a government or state entity that is involved in cyber-attacks or other activities targeting critical infrastructures of other nations [13];
- *foreign agents*: actors who professionally gather information and commit sabotage for governments;
- *industrial or economic espionage*: refers to actions carried out by one organization against another to acquire a competitive edge in domestic or international markets;
- *political dissidents*: actors who aim to utilize information and information technology to attain a political goal.

Thus, the full classification of the threat actor nature is shown in Figure 2.

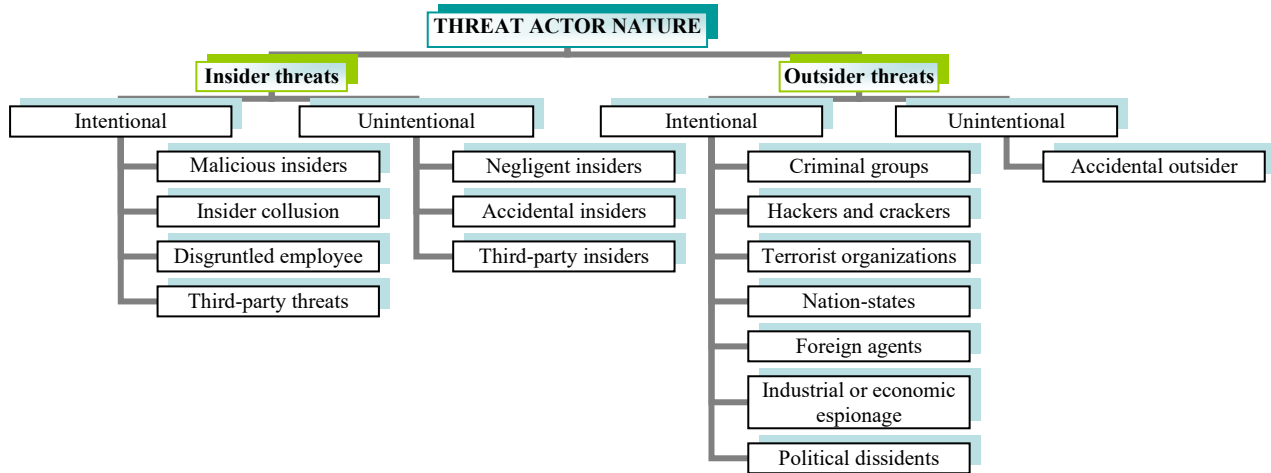


Figure 2. The threat actor's nature classification

### B. Constantly and rapidly evolving cyber threat nature

Nowadays, the cyber threat landscape is currently and rapidly evolving that caused by utilizing AI-driven and modern technologies, such as quantum computing, etc. Tactics, techniques, and methods of modern cyber-attacks are also rapidly evolving. Another threat is APT groups. They continue to pose a significant threat by using sophisticated methods to infiltrate and dwell within networks unnoticed [14]. Regarding quantum computing, it is a fast-evolving technology that has the potential to transform cybersecurity, but it can also be exploited to break encryption protocols [15].

Thus, we decided to put this category as a cybersecurity threat nature. Subcategories are shown in Figure 3.

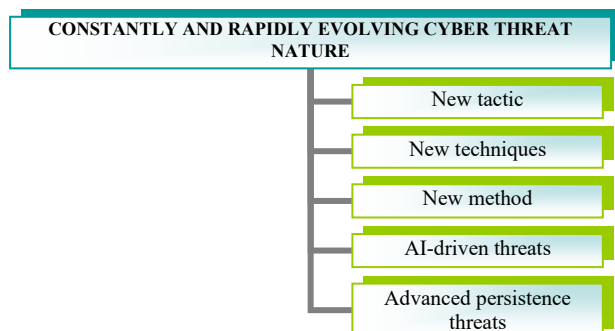


Figure 3. The constantly and rapidly evolving cyber threat nature subclassification

### C. Covert nature

Covert cyber threats pose a significant challenge due to their ability to remain undetected within target systems for extended periods. Such threats often employ advanced persistence techniques, allowing

them to maintain access to compromised systems even as security measures evolve. This long-term access can enable continuous surveillance, data exfiltration, and other malicious activities without raising alarms [16]. Furthermore, these threats exploit vulnerabilities to establish a foothold within networks, utilizing covert channels to communicate with command-and-control servers while avoiding detection [17].

### D. Technical/non-technical treats

Threats, both technical and non-technical, require more details. There are various dimensions in which it might occur, such as network-based dimension or internal dimension.

Threats, both technical and non-technical, require more details. There are various dimensions in which it might occur, such as network-based dimension or internal dimension. Thus, we may focus on the following aspects or dimensions of technical cyber security threats: persistent and sophisticated threats, network-based threats, credential and access threats, disruptive threats, software and web applications, modern technology threats (such as cloud computing, quantum computing, and Internet of Things (IoT) threats), social engineering (SE), and deceptive threats (here, it means SE that caused by using technologies, for example, phishing attacks, account takeover, etc.)

Threats that are not technological are those that use strategies and techniques to influence people's actions or take advantage of their weaknesses to obtain unauthorized access to private data or systems. Because these threats rely on organizational procedures, human variables, and legal nuances, they are especially difficult to prevent. The following can be highlighted as non-technical cyber security threats: the dimension

of internal threats, the dimension of physical breaches, the dimension of third-party cyber security risks, the dimension of SE and identity fraud cyber security threats, and the dimension of legal and regulatory cyber security risks.

The subclassification of this threat nature is shown in Figure 4.

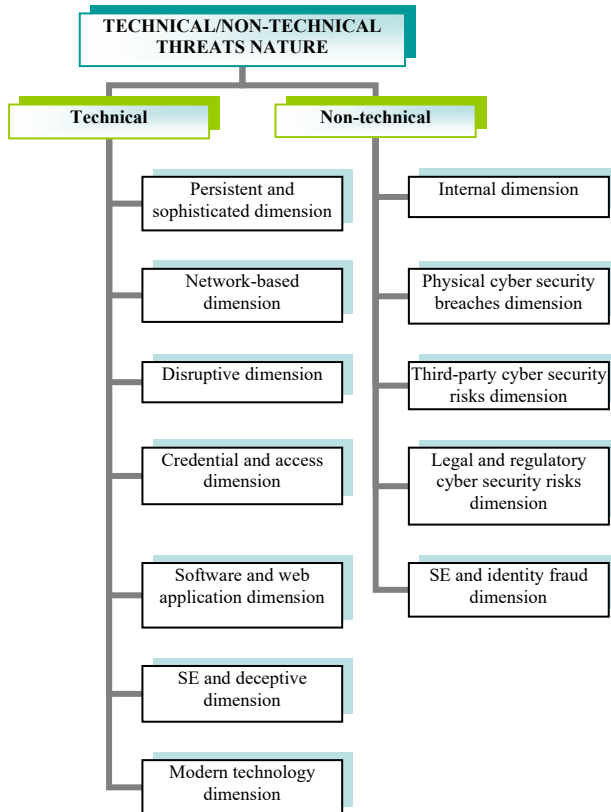


Figure 4. The technical/non-technical cyber threat nature subclassification

VI. CONCLUSIONS

The evolving nature of cyber threats requires a more accurate and detailed classification. Traditional models often lack the depth necessary to fully capture the complexity of modern cyber threats, especially those that use advanced technologies such as artificial intelligence and quantum computing. This paper proposes a new approach to classifying cyber threats by their nature, taking into account factors such as the nature of threat actors, the dynamic development of threat tactics, and the covert strategies often employed by sophisticated adversaries. By adopting this more detailed classification, organizations can better predict threats, strengthen their defenses, and address most aspects of today's threat landscape.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Shota Rustaveli National Foundation of Georgia (SRNSFG) (NFR-22-14060) and “Methods of building protected multilayer cellular networks 5G / 6G based on the use of artificial intelligence algorithms for monitoring country’s critical infrastructure objects” (# 0124U000197).

REFERENCES

- [1] Prabhu, Sunitha & Thompson, N. (2020). A Unified Classification Model of Insider Threats to Information Security.
- [2] “The nature of cyber threat - Horizon 2020 Projects”. Horizon 2020 Projects. [Online]. Available: <https://horizon2020projects.com/special-reports/the-nature-of-cyber-threat/>.
- [3] Tsaruk, Oleksandr, and Maria Komiiets. "Hybrid nature of modern threats for cybersecurity and information security." Smart Cities and Regional Development (SCRD) Journal 4.1 (2020): 57-78.
- [4] W. Tounsi and H. Rais, “A survey on technical threat intelligence in the age of sophisticated cyber attacks,” Comput. & Secur. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.09.001>.
- [5] Winkler, Ira S. "The non-technical threat to computing systems." Computing systems 9.1 (1996): 3-14.
- [6] Geric, Sandro & Hutinski, Željko. (2007). Information system security threats classifications. Journal of Information and Organizational Sciences. 31.
- [7] Ruf, Lukas et al. “Threat Modeling in Security Architecture – The Nature of Threats.” (2008).
- [8] Alhabeeb, Mohammed & Almuhaideb, Abdullah & Le, Phu & Bala, Srinivasan. (2010). Information Security Threats Classification Pyramid. 208-213. 10.1109/WAINA.2010.39.
- [9] Jouini, M., Rabai, L. B. A., & Aissa, A. B. (2014). Classification of security threats in information systems. Procedia Computer Science, 32, 489-496.
- [10] “Defining Insider Threats | CISA”. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency CISA. [Online]. Available: <https://www.cisa.gov/topics/physical-security/insider-threat-mitigation/defining-insider-threats>.
- [11] “What Is an Insider Threat? Definition, Types, and Prevention | Fortinet”. Fortinet. [Online]. Available: <https://www.fortinet.com/resources/cyberglossary/insider-threats>.
- [12] “What Is an Insider Threat? Definition, Examples, and Mitigations | UpGuard”. Third-Party Risk and Attack Surface Management Software | UpGuard. [Online]. Available: <https://www.upguard.com/blog/insider-threat>.
- [13] “Nation-State Actor”. ScienceDirect. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/nation-state-actor>.
- [14] “Understanding the Evolving Cyber Threat Landscape: Key Insights from Fortinet's Latest Report - Orro”. Orro. [Online]. Available: <https://orro.group/understanding-the-evolving-cyber-threat-landscape-key-insights-from-fortinets-latest-report/>.
- [15] Alam, Shahid. "Cybersecurity: Past, present and future." arXiv preprint arXiv:2207.01227 (2022).
- [16] Hall, Carissa G., and Neil C. Rowe. "Options for Persistence of Cyberweapons." (2018).
- [17] Lamshöft, Kevin, et al. "Knock, knock, log: Threat analysis, detection & mitigation of covert channels in syslog using port scans as cover." Forensic Science International: Digital Investigation 40 (2022): 301335.



# Інституційні механізми забезпечення кібербезпеки в Європейському Союзі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.057>

Оксана Кардаш

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[o.l.kardash@nuwm.edu.ua](mailto:o.l.kardash@nuwm.edu.ua)

Любомир Гладун

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[l.v.gladun@nuwm.edu.ua](mailto:l.v.gladun@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – Проведено дослідження інституційних та організаційно-правових механізмів забезпечення кібербезпеки в Європейському Союзі. Здійснено аналіз співпраці Європейського Союзу з Україною і сфері кібербезпеки. Виокремлено основні загрози кіберпростору ЄС та механізми їх подолання.

**Ключові слова** – кібербезпека, кіберзагрози, кіберзлочинність, кібератака, кіберпростір.

## I. ВСТУП

Сьогоденний прогрес цифрових технологій змінює економіку країн, а також світові тенденції та бізнес. Суспільство залежить від цифрових послуг, як і компанії та державні установи, які залежать від цифрових мереж та інфраструктур для виконання своїх основних завдань.

Саме через цю розгалужену мережу та зростаючу залежність від цифрових послуг зростає вразливість суспільства. Кібератаки та інциденти можуть мати величезний вплив на безпеку країн та їх економіку, порушуючи пропозиції послуг і порушуючи діяльність бізнесу та уряду.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Підвищення цифрової стійкості країн та забезпечення кібербезпеки в цифровому світі в цілому мають велике значення як для процвітання європейських країн, так і для їх безпеки. Тому кібербезпека є одним із головних пріоритетів Європейського Союзу та центральним спільним викликом для держав, бізнесу, науки та суспільства.

Закон ЄС про кібербезпеку визначає *кібербезпеку* як усі дії, необхідні для захисту мережевих та інформаційних систем, користувачів таких систем та інших осіб, які можуть постраждати від кіберзагроз [1]. Європейський Союз працює на різних фронтах, щоб сприяти кіберстійкості, захистити власні комунікації та дані, а також забезпечити безпеку онлайн-суспільства та економіки.

Основними інституціями ЄС в сфері кібербезпеки є [1], [2]:

- ENISA – це агентство ЄС, яке займається кібербезпекою. Воно надає підтримку державам-членам, інституціям ЄС та підприємствам у ключових сферах.

- ISAC -центри обміну та аналізу інформації, які сприяють співпраці між спільнотою кібербезпеки в різних секторах економіки.

- JRC - спільний дослідницький центр, який активно сприяє кібербезпеці в ЄС. Він займається розробкою таксономії кібербезпеки, узгоджує термінологію, яка використовується в кібербезпеці, формує звіти про поточний ландшафт кібербезпеки ЄС та його історію.

- CSIRT - групи реагування на інциденти комп'ютерної безпеки Ці команди на практиці справляються з інцидентами та ризиками кібербезпеки. Вони співпрацюють один з одним на рівні ЄС, а також співпрацюють з приватним сектором. Усі типи операторів основних послуг і постачальників цифрових послуг мають бути охоплені призначеними CSIRT.

Основними завданнями CSIRT є:

- моніторинг інцидентів на національному рівні;

- надання раннього попередження, попереджень, оголошень та іншої інформації про ризики та інциденти відповідним зацікавленим сторонам;

- реагування на інциденти;
- забезпечення динамічного аналізу ризиків та інцидентів і ситуаційної обізнаності;

- ECSO - Європейська організація з кібербезпеки, яка здійснює діяльність, спрямовану на розбудову економіки та промисловий розвиток на європейському рівні. Більшість із 250 її членів належать або до галузі кібербезпеки, або до науково-дослідних та академічних установ в галузі.

- Women4Cyber – організація жінок ЄС, які працюють у сфері кібербезпеки.

- Платформа «Атлас кібербезпеки» (European Cybersecurity Atlas) - платформа управління знаннями для картографування, класифікації та стимулювання співпраці між європейськими експертами з кібербезпеки на підтримку цифрової стратегії ЄС.

- Європейський промисловий, технологічний і дослідницький центр компетенції в галузі кібербезпеки, який об'єднує досвід і узгоджує європейський розвиток і впровадження технологій кібербезпеки. Він співпрацює з промисловістю, академічним співтовариством та



іншими, щоб виробити спільну програму для інвестицій у кібербезпеку, а також визначити пріоритети фінансування досліджень,

### III. ВИРШЕННЯ ПОСТАВЛЕНИХ ЗАДАЧ

Основні механізми забезпечення кібербезпеки ЄС викладено в:

Стратегія кібербезпеки ЄС - яка має на меті створити стійкість до кіберзагроз і забезпечити громадянам і підприємствам користь від надійних цифрових технологій. Стратегія зосереджена на розбудові колективних можливостей для реагування на великі кібератаки та співпрацює з партнерами по всьому світу для забезпечення міжнародної безпеки та стабільності в кіберпросторі. Стратегія містить конкретні пропозиції щодо застосування трьох основних інструментів: регуляторних, інвестиційних та політичних ініціатив. Вони стосуватимуться трьох сфер діяльності ЄС:

- стійкість, технологічний суверенітет і лідерство;
- оперативні можливості для запобігання, стримування та реагування;
- співробітництво для розвитку глобального та відкритого кіберпростору.

Нова стратегія кібербезпеки ЄС для Цифрового десятиліття є ключовим компонентом Формування цифрового майбутнього Європи, Плану відновлення Європи Комісії та Стратегії Союзу безпеки на 2020-2025 роки.

Директива NIS2 - директива про безпеку мережевих та інформаційних систем та заходи для високого загального рівня кібербезпеки в ЄС, яка координує діяльність урядових органів країн, обмін інформацією та здійснення спільних операцій. Директива імplementована 18.10. 2024 р.

Закон про захист від кібернетичного середовища (The Cyber Resilience Act) - нормативно-правовий акт щодо вимог до кібербезпеки для продуктів із цифровими елементами, який посилює правила кібербезпеки, щоб забезпечити більш безпечні апаратні та програмні продукти.

Закон про кіберсолідарність (Cyber Solidarity Act) - документ про кіберсолідарність, який включає Європейський щит кібербезпеки та комплексний механізм надзвичайних ситуацій у сфері кібернетичної безпеки для створення кращого методу кіберзахисту.

Система сертифікації IT-продуктів та послуг ([EU-wide certification framework](#)) - загальна схема сертифікації IT продуктів та послуг і відповідність їх стандартам кібербезпеки.

ЄС співпрацює з партнерами, щоб просувати спільні інтереси в політиці кібербезпеки. Дев'ятий Кібердіалог ЄС-США відбувся в Брюсселі в грудні 2023 року. ЄС і США просунулися у співпраці в таких сферах, як кібердипломатія, врегулювання криз, розбудова потенціалу, кібербезпека критичної інфраструктури (включно зі звітуванням про інциденти), кібербезпека апаратного забезпечення та програмні продукти (включаючи спільний план

дій щодо кібербезпечних продуктів), а також аспекти кібербезпеки нових технологій, таких як ШІ [3].

З 2021 року ЄС та Україна провели два Кібердіалоги. У 2023 році Агентство ЄС з кібербезпеки ENISA офіційно уклало робочу домовленість з українськими партнерами для сприяння розбудові потенціалу, обміну найкращими практиками та обізнаності про ситуацію. ЄС також запровадив кібердіалоги з Індією, Японією, Республікою Корея та Бразилією. Перший кібердіалог між ЄС і Великобританією відбувся в Брюсселі в грудні 2023 року.

### ВИСНОВКИ

Таким чином, процес становлення кіберзаконодавства в країнах-членах ЄС розпочався у 2001 році й досі набирає оберти, створюючи нове законодавство в цій галузі. Однак з позиції системного підходу більшість проблем кібербезпеки виникає через відставання сучасної законодавчої бази від науково-технічного прогресу. За декілька останніх десятиліть відбулася потужна технологічна революція в галузі використання комп'ютерів та телекомунікацій, яка привела до принципових змін та збільшення апаратного парку, суттєвого прискорення швидкості передачі інформації.

ЄС має очолити зусилля щодо безпечної цифровізації. Це має стати рушійною силою для рішень світового рівня та стандартів кібербезпеки для основних послуг і критичної інфраструктури, а також стимулювати розвиток і застосування нових технологій. Уряди, підприємства та громадяни розділять відповідальність за забезпечення кіберзахисної цифрової трансформації.

Водночас саме стрімкий інформаційний прогрес спричинив проблему захищеності персональних даних через виникнення глобальних лідерів, що призвело до концентрації інформації в руках «великих гравців мережі» та централізації загальної інфраструктури. Це зробило можливими великомасштабні атаки та створило великі ризики значних збитків при критичних пошкодженнях інфраструктури таких систем.

Тому, незважаючи на існуючу сучасну низку документів щодо кібербезпеки, остання досі залишається досить вразливою, незалежно від ступеня розробки і стану законодавства, виявляючи випереджаючі проблемні науково-технічні прогалини щодо підвищення якості та стану кібербезпеки в ЄС загалом

### ЛІТЕРАТУРА

[1] EU cybersecurity initiatives working towards a more secure online environment / European Union [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://elck.ru/FEMKo>.

[2] About ENISA / European Union Agency for Network and Information Security [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.enisa.europa.eu/about-enisa>

[3] Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on ENISA, the «EU Cybersecurity Agency», and repealing Regulation (EU) 526/2013, and on Information and Communication Technology cybersecurity certification («Cybersecurity Act»)

# Використання нейроморфних обчислень для виявлення та запобігання кіберзагроз у комп'ютерних мережах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.058>

Каштан Наталія

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
nata.khel809@gmail.com

*Анотація* – У роботі досліджуються способи захисту від кіберзагроз, які базуються на нейроморфних обчисленнях. Дослідження нейроморфних обчислень спрямоване на розробку обчислювальних систем, що імітують структуру та функції людського мозку. Нейроморфні системи володіють унікальними характеристиками, які можуть бути використані для створення більш ефективних і надійних методів протидії кіберзагрозам

**Ключові слова** – *нейроморфні обчислення, кібербезпека, комп'ютерні мережі, аномалія, методи захисту*

## I. ВСТУП

В епоху цифрової трансформації компанії та урядові організації стикаються з постійним зростанням кількості та складності кіберзагроз. Традиційні системи кіберзахисту, засновані на відомих шаблонах і сигнатурах, вже не здатні повною мірою захистити інфраструктуру від нових та швидко еволюціонуючих атак. Цей виклик вимагає впровадження нових підходів до кібербезпеки, які могли б забезпечити проактивний захист. Одним із перспективних рішень є нейроморфні обчислення – технологія, яка моделює роботу біологічних нейронів і має великий потенціал для виявлення та запобігання кіберзагрозам [1].

Застосування нейроморфних обчислень у сфері кібербезпеки охоплює інноваційні підходи для виявлення, запобігання та реагування на кіберзагрози з високою швидкістю та точністю. Однією з головних переваг нейроморфних обчислень є їх здатність до виявлення аномалій і розпізнавання образів.

## II. НЕЙРОМОРФНІ ОБЧИСЛЕННЯ

Нейроморфні обчислення – це міждисциплінарна галузь, яка поєднує принципи нейронауки, інформатики та комп'ютерної інженерії. Термін «нейроморфний» означає «подібний до мозку». Комп'ютери розробляються та проектуються таким чином, щоб відобразити структуру та функції людського мозку.

Основна мета нейроморфних обчислень полягає у створенні апаратного забезпечення, яке працює подібно до нейронних мереж у біологічних організмах, що дозволяє виконувати обчислення більш ефективно, з меншою енерговитратою та високою швидкістю, ніж звичайні комп'ютери, якими ми користуємося сьогодні [1].

Нейроморфні обчислення націлені на відтворення нейронної структури мозку за допомогою апаратних та програмних моделей, які називають нейроморфними чіпами або системами. Ці системи складаються зі штучних нейронів і синапсів, що дозволяють одночасно обробляти інформацію та адаптуватися до даних у реальному часі. На відміну від класичної архітектури фон Неймана, де пам'ять і процесор розділені, нейроморфні системи поєднують ці функції, що прискорює обчислення та знижує енергоспоживання, що особливо важливо для додатків з високими вимогами, як-от кібербезпека.

## III. ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОМОРФНИХ ОБЧИСЛЕНЬ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ КІБЕРЗАГРОЗ

Нейроморфні обчислення відкривають нові можливості в сфері кібербезпеки завдяки інноваційним підходам для виявлення, запобігання та реагування на загрози з високою точністю і швидкістю. Особливо ефективними ці системи є у виявленні аномалій та розпізнаванні образів. Традиційні методи кіберзахисту здебільшого базуються на виявленні загроз через порівняння з відомими сигнатурами шкідливої активності. Проте такий підхід не завжди справляється з новими або змінюваними загрозами, для яких сигнатури ще не розроблені. Нейроморфні обчислення долають це обмеження завдяки здатності навчатися на нових даних та оперативно адаптуватися до невідомих шаблонів у реальному часі [4].

Нейроморфні моделі, навчені на великих масивах даних про нормальну та аномальну поведінку мережі, здатні самостійно ідентифікувати аномалії, що можуть свідчити про потенційні кіберзагрози. Нейронні мережі таких систем постійно оновлюють свої внутрішні моделі на основі нових даних, що дозволяє їм помічати навіть найменші відхилення від звичайної поведінки, які

можуть сигналізувати про атаку або спробу несанкціонованого доступу. Окрім цього, нейроморфні обчислення значно підсилюють кіберзахист завдяки своїм можливостям самонавчання і прогнозу аналітики. Аналізуючи історичні дані, нейронні мережі можуть виявляти повторювані шаблони атак і передбачати майбутні загрози ще до їхнього виникнення. Такий проактивний підхід дозволяє організаціям зміцнювати свій захист, реалізовувати ефективні стратегії зменшення ризиків і мінімізувати наслідки кіберінцидентів [2].

Нейроморфні обчислення також відіграють ключову роль в адаптивних і динамічних механізмах захисту. Традиційні системи безпеки часто базуються на статичних правилах і порогових значеннях, які можуть бути легко обійдені досвідченими зловмисниками. Натомість нейроморфні системи постійно адаптують свої методи захисту відповідно до розвитку загроз і змін у середовищі. Вони здатні автоматично коригувати контроль доступу, змінювати протоколи шифрування або перенаправляти мережевий трафік у відповідь на підозрілі дії або аномалії. Це дозволяє знижувати ризики в режимі реального часу і забезпечувати стабільну роботу системи. Більше того, інтеграція нейроморфних обчислень із платформами для аналізу загроз та системами управління інформацією і подіями безпеки (SIEM) покращує масштабованість та ефективність операцій у сфері кібербезпеки [5].

Нейроморфні моделі здатні одночасно обробляти величезні обсяги різноманітних даних, таких як мережеві журнали, поведінкові патерни користувачів та інформацію про загрози. Це сприяє швидкому виявленню й кореляції можливих інцидентів безпеки. Завдяки здатності порівнювати різні джерела даних та знаходити приховані взаємозв'язки, нейроморфні системи допомагають аналітикам кібербезпеки ефективніше розставляти пріоритети та досліджувати попередження, скорочуючи час реакції і покращуючи здатність до реагування на інциденти.

#### IV. РОЗРОБКА МЕТОДІВ КІБЕРЗАХИСТУ

Розробка методів кіберзахисту на основі нейроморфних обчислень включає кілька основних етапів, серед яких – створення моделей нейронних мереж для аналізу кіберзагроз, реалізація адаптивних систем виявлення загроз, автоматизована відповідь на атаки.

Спеціалізовані нейроморфні процесори можуть використовувати моделі штучних нейронних мереж для аналізу аномалій у мережевому трафіку. Це дозволяє виявляти небезпечну активність і блокувати її на ранніх стадіях, знижуючи ймовірність успішної атаки.

Нейроморфні системи здатні навчатися на нових патернах загроз у реальному часі, дозволяючи створювати адаптивні рішення для запобігання

кіберзагрозам. Це особливо корисно для боротьби з сучасними атаками, які швидко змінюють свою форму [4].

Використовуючи здатність нейроморфних систем до швидкої обробки даних, вони можуть автоматично реагувати на виявлені загрози, нейтралізуючи їх ще до того, як вони зможуть завдати шкоди. Це значно зменшує ризики для інформаційної інфраструктури.

#### V. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Нейроморфні обчислення відкривають нові горизонти в розробці методів кіберзахисту, пропонуючи адаптивні, ефективні та енергоощадні рішення для боротьби з сучасними кіберзагрозами. Завдяки здатності до самоорганізації, адаптивності та швидкої обробки великих обсягів даних, ці системи можуть стати ключовим елементом нової ери в інформаційній безпеці.

Підсумовуючи, варто зазначити, що розробка методів захисту від кіберзагроз на основі нейроморфних обчислень є справжнім проривом у сфері кібербезпеки. Використовуючи принципи нейробіології для відтворення обчислювальної потужності мозку та його здатності до адаптивного навчання, нейроморфні системи надають організаціям можливість швидко, точно та ефективно виявляти, запобігати та реагувати на кіберзагрози, забезпечуючи високу стійкість до атак.

Впровадження нейроморфних обчислень у сферу кіберзахисту є перспективним напрямком, який дозволяє підвищити ефективність протидії сучасним кіберзагрозам, знизити ризики атак та забезпечити безпеку критично важливих інформаційних систем.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Gigacloud, "Нейроморфні обчислення: що це та в чому суть," URL: <https://gigacloud.ua/blog/navchannja/nejromorfni-obchislennja-scho-ce-ta-v-chomu-sut> (date of access: 12.10.2024).
- [2] Д.С. Мигуль, Н.Н. Шаповалова, "Нейроморфні процеси і системи," *Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі*: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної web конференції аспірантів, студентів та молодих вчених (24-26 березня 2020 р.), Кривий Ріг, КРПУ, 2020, С. 176–178.
- [3] L.R. Iyer, Y. Chua and H. Li, "Is Neuromorphic MNIST Neuromorphic? Analyzing the Discriminative Power of Neuromorphic Datasets in the Time Domain," *Frontiers in Neuroscience*, Vol. 15, 2021, 21p., DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.608567>.
- [4] H.-T. Peng, M.A. Nahmias, T. Ferreira de Lima, A.N. Tait and B.J. Shastri, "Neuromorphic Photonic Integrated Circuits," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 24, №6, 2018, 15p., DOI: <http://doi.org/10.1109/jstqe.2018.2840448>.
- [5] А.В. Лемешко, А.В. Антоненко, А.В. Петрик, "Нейроморфні системи як інструмент реалізації штучного інтелекту," *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, Випуск 34 (73), Т.3, 2023, С. 175-183. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.1/28>

# Сучасні методи захисту веб-сайту

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.059>

Кирило Курчак

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[kurchak\\_ak21@nuwm.edu.ua](mailto:kurchak_ak21@nuwm.edu.ua)

Вікторія Рейнська

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[v.b.reinska@nuwm.edu.ua](mailto:v.b.reinska@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – З кожним роком, зростає кількість організацій, які використовують та створюють власні веб-сайти, а також кількість користувачів, які взаємодіють з ними. Разом із цим, збільшується і кількість кіберзлочинців, так званих хакерів, які діють самостійно або в складі організованих груп. У даній статті проаналізовано основні типи атак, які використовують кіберзлочинці, для витягування даних з веб-сайтів. Наведено сучасні методи, які використовуються для захисту веб-сайтів.

**Ключові-слова** – веб-сайт; веб-ресурс; вразливість веб-сторінки; кіберзагроза; кіберзлочинність; методи захисту веб-сайтів; програми для захисту веб-сайтів; скайнери для захисту веб-сайтів;

## I. ВСТУП

У сучасному цифровому світі Інтернет став фундаментом багатьох сфер життя — від бізнесу і освіти, до розваг і соціальних взаємодій. Щороку збільшується кількість веб-ресурсів, що надають користувачам широкий спектр послуг, але разом із цим зростає і ризик кіберзагроз. Веб-сайти стають мішенню для хакерів, які використовують вразливості у системах безпеки для викрадення конфіденційної інформації, шантажу, поширення шкідливого програмного забезпечення та дестабілізації роботи веб-сайтів.

Сучасні кіберзлочинці вдосконалюються свої методи атак, шукаючи нові шляхи для порушення нормальної роботи сайтів і викрадення даних. У цьому контексті компанії та власники веб-сайтів змушені не тільки слідкувати за розвитком загроз, але й впроваджувати комплексні заходи безпеки. Це включає постійний моніторинг вразливостей, своєчасні оновлення систем та використання програмних рішень для забезпечення захищеності веб-ресурсів, що є життєво важливим у боротьбі з кіберзлочинністю.

## II. МЕТА СТАТТІ

Метою даної статті є аналіз найпоширеніших кіберзагроз, що впливають на безпеку веб-сайтів, а також розгляд сучасних методів їх захисту. У статті буде представлено перелік розповсюджених атак на веб-ресурси, роз'яснено механізми їх впливу на функціонування сайтів, а також запропоновано ефективні інструменти та методи для перевірки і підвищення рівня безпеки веб-сторінок.

## III. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Відповідно до досліджень OWASP (Open Web Application Security Project), організації, яка займається підвищенням безпеки веб-додатків на глобальному рівні, було складено ключові загрози для безпеки веб-сайтів, які використовують вразливості у системах безпеки для викрадення конфіденційної інформації, шантажу, поширення шкідливого програмного забезпечення та дестабілізації роботи веб-сайтів [1].

- Недостатній контроль доступу (Broken Access Control): ця вразливість виникає, коли веб-додатки не належним чином перевіряють, чи має користувач права на доступ до певних ресурсів або функцій. Це може дозволити зловмисникам отримати доступ до конфіденційної інформації, модифікувати дані чи виконувати дії від імені інших користувачів. Відповідно до [1], ця проблема підкреслює важливість надійних механізмів автентифікації та авторизації.
- Криптографічні помилки (Cryptographic Failures): ця загроза пов'язана з невірним використанням або налаштуванням криптографічних методів. Наприклад, нешифроване зберігання паролів або використання застарілих алгоритмів шифрування можуть призвести до витоку чутливих даних. Це підкреслює важливість використання сучасних криптографічних стандартів та регулярного оновлення механізмів безпеки [1].
- Ін'єкції (Injection): атаки типу ін'єкцій, такі як SQL-ін'єкції, XSS (Cross-Site Scripting) та Command Injection, відбуваються, коли зловмисник вставляє шкідливий код або команди в запити до бази даних. Це може призвести до викрадення даних, модифікації бази даних чи виконання небезпечних команд на сервері. За інформацією з [1], ці атаки є одними з найпоширеніших і небезпечних, тому

важливо вживати заходів для запобігання їм.

- **Небезпечний дизайн (Insecure Design):** ця загроза виникає, коли в процесі розробки веб-додатків не враховуються принципи безпеки, що призводить до недоліків у проектуванні системи. Відсутність правильної моделі загроз або недостатня увага до принципів безпеки може зробити систему уразливою до атак.
- **Неправильна конфігурація безпеки (Security Misconfiguration):** Ця уразливість виникає, коли система не налаштована належним чином, що може дозволити зловмисникам отримати доступ до чутливих даних або функцій. Наприклад, якщо сервери залишаються з налаштуваннями за замовчуванням або недостатньо захищені, це робить їх мішенню для атак. Як зазначається в [2], що навіть невеликі помилки конфігурації можуть призвести до серйозних наслідків, таких як витік даних або недоступність веб-додатків..
- **Вразливі та застарілі компоненти (Vulnerable and Outdated Components):** використання застарілого програмного забезпечення та бібліотек, які містять відомі вразливості, є серйозною загрозою безпеці. Наприклад, незахищені плагіни або старі версії фреймворків можуть стати мішенню для атак.
- **Серверні запити (Server-Side Request Forgery):** Ця атака дозволяє зловмисникам змусити сервер відправляти запити до небезпечних адрес, що може призвести до витоку даних або компрометації системи. У [3] наведено приклади, як цей тип атаки може вплинути на безпеку веб-додатків.
- **Невідповідний моніторинг і ведення журналів (Security Logging and Monitoring Failures):** Неналежний моніторинг може завадити своєчасному виявленню загроз та інцидентів безпеки, що може призвести до серйозних наслідків, включаючи довготривалу компрометацію системи. Якщо система не веде адекватні журнали безпеки, зловмисники можуть діяти безкарно. У [4] зазначається, що слабе ведення журналів часто стає причиною того, що інциденти не виявляються вчасно, що дає хакерам більше можливостей для атаки.
- **Проблеми з ідентифікацією та автентифікацією (Identification and Authentication Failures):** Ці вразливості виникають, коли системи не належать достатньо надійні механізми перевірки особи ко-

ристувачів, що дозволяє зловмисникам отримувати доступ до захищених ресурсів. Наприклад, слабкі паролі, відсутність двофакторної автентифікації або неправильне управління сесіями можуть призвести до несанкціонованого доступу. Як вказується в [5], усунення таких вразливостей є критично важливим для забезпечення безпеки веб-додатків.

- **Помилки цілісності програмного забезпечення та даних (Software and Data Integrity Failures):** Ці вразливості пов'язані з припущеннями щодо цілісності програмних оновлень, критичних даних і процесів безперервної інтеграції/безперервної доставки (CI/CD). Якщо оновлення або дані не перевіряються на цілісність, зловмисники можуть маніпулювати ними, що призводить до серйозних наслідків. Як зазначається в [6], важливо впроваджувати належні методи верифікації для забезпечення цілісності даних і програмного забезпечення.

Усі ці кіберзагрози можуть призвести до втрати чутливої інформації, що ставить під загрозу фінансову безпеку користувачів. Крім того, збої в роботі сайту можуть призвести до тимчасового закриття онлайн-магазинів чи блогів, що негативно вплине на доходи. Атаки можуть також спричинити фінансові санкції за недотримання стандартів безпеки, таких як PCI DSS. Важливим є також ризик потрапляння в чорний список пошукових систем, як-от Google, через наявність шкідливого коду на сайті, що може суттєво знизити видимість та трафік [7].

Всі ці фактори можуть серйозно зашкодити репутації бізнесу, адже навіть один інцидент може відштовхнути клієнтів і знизити довіру до бренду. Важливо усвідомлювати ці ризики та вживати заходів для їх запобігання, щоб зберегти безпеку та стабільність у цифровому середовищі[7].

Для захисту веб-ресурсів від зазначених загроз використовуються різні інструменти та методи, які допомагають ідентифікувати вразливості та запобігати атакам.

### 1) Використання SSL/HTTPS

Використання SSL-сертифікатів для шифрування трафіку між користувачем і сервером є одним із основних засобів захисту. Це допомагає захистити конфіденційні дані, такі як паролі та фінансова інформація, від перехоплення. Багато компаній, зокрема Cloudflare, пропонують рішення для забезпечення HTTPS, що робить його доступним для власників веб-сайтів.[8]

### 2) Web Application Firewalls (WAF)



Міжмережний екран (він же брандмауер чи фаєрвол) — це захисний механізм, що моніторить та фільтрує HTTP-запити, блокуючи підозрілі дії. Це дозволяє захистити веб-додатки від атак, таких як ін'єкції та XSS. Платформи, як-от Cloudflare, надають послуги WAF, щоб захистити веб-сайти від численних загроз [8].

### 3) Сканери безпеки

Спеціалізовані сканери безпеки дозволяють виявляти вразливості на веб-сайтах, автоматично перевіряючи код на предмет наявності помилок або шкідливого програмного забезпечення. Наприклад, такі інструменти, як Sucuri та SiteLock, можна використовувати для регулярного моніторингу безпеки, що дозволяє оперативно виявляти потенційні загрози. [9,10]

### 4) Своєчасні оновлення програмного забезпечення

Регулярне оновлення всіх компонентів веб-сайту, таких як бібліотеки, плагіни та основне програмне забезпечення, є критично важливим для забезпечення безпеки. Застаріле програмне забезпечення часто містить вище згадані вразливості, які зловмисники можуть використовувати для атак. Коли виробники випускають оновлення, вони зазвичай усувають ці вразливості та впроваджують нові функції, що підвищують загальний рівень захисту

### 5) Двофакторна автентифікація (2FA)

Двофакторна автентифікація забезпечує додатковий рівень захисту, вимагаючи від користувачів не лише введення пароля, а й підтвердження своєї особи за допомогою другого фактора, наприклад, коду, надісланого на мобільний телефон. Даний метод як можна впровадити свій сайт через написання коду, так і через використання таких сервісів, як Duo Security [11]

### 6) Резервне копіювання даних

Регулярне резервне копіювання інформації дозволяє відновити дані в разі втрати або атаки. Це важливий крок для запобігання втратам важливої інформації. Один зі способів впровадження цього методу — використання автоматизованих систем резервного копіювання, такі як Idrive, Backblaze, які регулярно зберігають копії даних на віддалених серверах або в хмарі. Це забезпечує надійний захист, оскільки дані не зберігаються на одному пристрої і можуть бути легко відновлені. Інший спосіб — зберігання резервних копій на фізичних носіях, таких як зовнішні жорсткі диски або USB-накопичувачі. Цей метод дає змогу мати фізичну копію даних, що може бути корисним у випадку збою системи або кібератаки, яка заважає доступу до основних даних. [12,13]

## IV. ВИСНОВОК

У сучасному цифровому світі захист веб-сайтів від кібератак є критично важливим для забезпечення безпеки особистої інформації та підтримки бізнес-процесів. Виявлені загрози, такі як ін'єкції, атаки честарез конфігурації, фальшиві автентифікації та інші, можуть призвести до серйозних наслідків, включаючи втрату чутливої інформації, фінансові втрати і шкоду репутації. Впровадження ефективних заходів безпеки, таких як своєчасне оновлення програмного забезпечення, резервне копіювання даних, використання надійних паролів та шифрування, є необхідним кроком для мінімізації ризиків.

Успішна реалізація методів, які наведено в статті дозволяє не лише запобігти можливим атакам, а й забезпечити безперервність бізнес-процесів. Сьогодні важливо не лише реагувати на загрози, але й проактивно підходити до кібер-безпеки, щоб захистити веб-ресурси від потенційних ризиків у майбутньому.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] OWASP Top Ten : веб-сайт. URL:<https://owasp.org/Top10/> (дата звернення 14.10.2024).
- [2] What Is Security Misconfiguration? : веб-сайт. URL: <https://www.crowdstrike.com/en-us/cybersecurity-101/exposure-management/security-misconfiguration/> (дата звернення: 14.10.2024).
- [3] SSRF (Server-Side Request Forgery) : веб-сайт. URL: <https://cqr.company.ua/web-vulnerabilities/ssrf/>. (дата звернення 14.10.2024).
- [4] Risk of Security and Monitoring Logging Failures : веб-сайт. URL: <https://www.softwaresecured.com/post/risk-of-security-and-monitoring-logging-failures> (дата звернення 14.10.2024).
- [5] Intro to Identification and Authentication Failures : веб-сайт. URL: <https://www.softwaresecured.com/post/intro-to-identification-and-authentication-failures> (дата звернення 14.10.2024).
- [6] Software and Data Integrity Failures: Explanation, Examples, Prevention : веб-сайт: URL: <https://qawerk.com/blog/software-and-data-integrity-failures/> (дата звернення 14.10.2024).
- [7] How to Make a Website Secure with 9 Quick Tips: веб-сайт. URL: <https://www.sitelock.com/blog/building-a-secure-website/> (дата звернення 14.10.2024)
- [8] Cloudflare: Connect, Protect and Build Everywhere : веб-сайт. URL: <https://www.cloudflare.com> (дата звернення 14.10.2024)
- [9] Sucuri - Complete Website Security, Protection & Monitoring... : веб-сайт. URL: <https://sucuri.net/> (дата звернення 14.10.2024).
- [10] SiteLock: Website Security Monitoring & Malware Protection : веб-сайт. URL: <https://www.sitelock.com/> (дата звернення 14.10.2024).
- [11] Duo Security: Identity Security, MFA & SSO : веб-сайт. URL: <https://duo.com/> (дата звернення 14.10.2024).
- [12] IDrive : веб-сайт. URL: <https://www.idrive.com/> (дата звернення 14.10.2024).
- [13] Backblaze: The Leading Open Cloud Storage Platform : веб-сайт. URL: <https://www.backblaze.com/> (дата звернення 14.10.2024).

# Моделювання кібер інцидентів в мультіагентному середовищі NetLogo

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.060>

Новосьолов Дмитро  
Поліський національний університет  
Житомир, Україна  
[Diman7842@gmail.com](mailto:Diman7842@gmail.com)

**Анотація** – В роботі розглянуто можливості мультіагентного середовища NetLogo для розв'язання задач імітаційного моделювання процесів забезпечення кібербезпеки, а також для аналізу моделей (підходів) реагування на інциденти в кіберпросторі. За основу обрано сімейство моделей SI(E)R поширення вірусу.

**Ключові слова** – NetLogo, мультіагентне моделювання, поширення вірусу в мережі, SIR.

**Вступ.** Стійкість системи в контексті забезпечення кібербезпеки полягає в здатності системи:

- визначати вразливості;
- оцінювати ризики;
- адекватно реагувати на виклики та інциденти;
- відновлювати функціонування в мінімальні строки з залученням мінімальної кількості ресурсів.

Основна проблема полягає в неповноті апрорної інформації щодо вразливостей, загроз та ризиків. Тому застосування імітаційного моделювання дозволяє аналізувати різні сценарії і тим самим збільшувати інформаційну обізнаність щодо можливих наслідків кібер інцидентів, а отже надає можливість розробляти адекватні плани реагування та відновлення.

Основна частина. За основу даної наукової роботи було обрано модель “Virus on network”. Дана модель підходить для розгляду та дослідження так, як вона має найбільш приближені умови для розвитку вірусів в будь якій захищеній системі.

Для цього спочатку буде описано саму модель для її розуміння в майбутньому для того щоб наступні дії були зрозумілі.

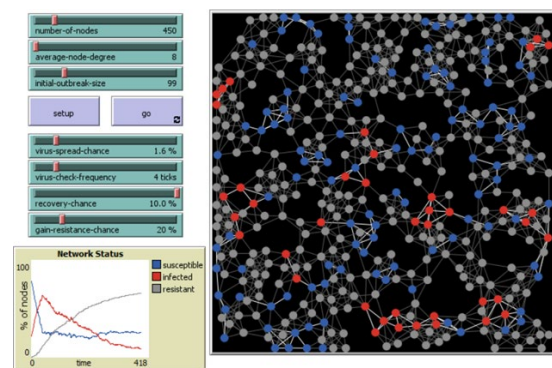


Рисунок 1 - модель Virus on network

Модель “Virus on Network” що зображена на Рисунок 1 використовується для симуляції поширення вірусу в мережі комп’ютерних вузлів, аналогічно до поширення комп’ютерних вірусів у кіберпросторі.

**number-of-nodes** (Кількість вузлів): Параметр, що визначає кількість комп’ютерів (вузлів) у мережі. Збільшення кількості вузлів розширює мережу, збільшуючи можливості для поширення вірусу.

**average-node-degree** (Середній ступінь вузла): Визначає середню кількість з’єднань (сусідів) у кожного вузла. Це параметр для моделювання рівня зв’язаності комп’ютерів і швидкості передачі вірусу.

**initial-outbreak-size** (Початковий розмір спалаху): Вказує кількість вузлів, заражених на початку моделювання. Збільшення цього параметра призводить до більшого початкового спалаху вірусу.

**virus-spread-chance** (Ймовірність поширення вірусу): Параметр, що визначає ймовірність поширення вірусу від зараженого вузла до сусіднього не зараженого. Вищі значення збільшують шанси на інфікування сусідів.

virus-check-frequency (Частота перевірки на вірус): Частота перевірки кожного вузла на наявність вірусу. Визначає, як часто вузли перевіряються на інфекцію або потребу в оновленні статусу.

recovery-chance (Ймовірність одужання): Визначає ймовірність того, що заражений вузол відновиться від вірусу і повернеться до нормального стану. Вищі значення сприяють швидкому зменшенню поширення вірусу.

gain-resistance-check (Частота перевірки на отримання стійкості): Частота перевірки вузла на можливість отримання стійкості до вірусу після одужання. Це дозволяє моделювати здатність вузла до отримання імунітету від подальшого зараження.

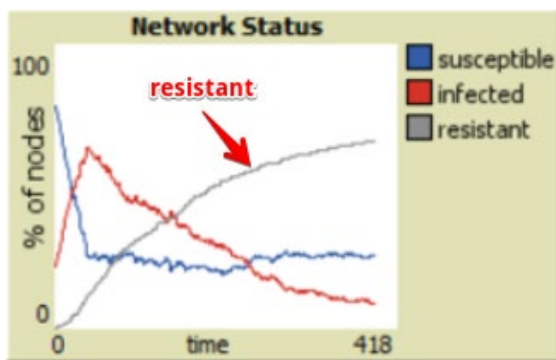


Рисунок 2 - відновлення системи

В даній роботі розглянемо virus-check-frequency, та її зміни з 1 пункту до 5, це значить, що система буде перевірятись частіше і шанс виявлення вірусів завчасно буде збільшено. Функція resistant показана на Рисунку 2 і в наступних Рисунках буде розглянуто саме її.

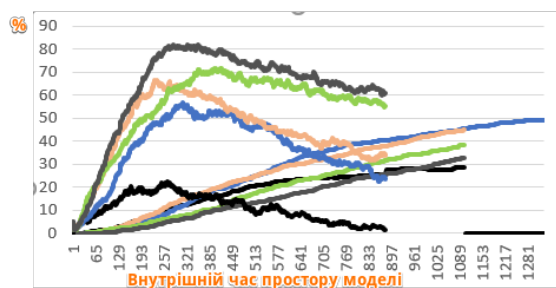


Рисунок 3 – залежність відновлення та зараження від параметру управління (virus-check-freq)

Рисунок 3 – демонструє динаміку адаптації системи з різними значеннями параметра virus-check-frequency (від 1 до 5), які відображені різними кольорами. Графіки показують, що зі збільшенням цього параметра від 1 до 5, система

стає більш ефективною у виявленні вірусу та запобіганні його поширенню. Кожен сценарій позначено відповідним кольором.

На графіку видно, що при найнижчому значенні частоти перевірки (значення 1, синя лінія) вірус поширюється найбільш інтенсивно, тоді як при збільшеному показнику частоти перевірки до 5 (червона лінія), система значно швидше виявляє інфекції та дозволяє вузлам набувати стійкості до повторних заражень (збільшення кількості resistant вузлів). Це показує, що частіші перевірки значно знижують поширення вірусу, забезпечуючи стійкість системи до інцидентів у кіберпросторі.

Висновок. Мультиагентне моделювання у середовищі NetLogo є ефективним інструментом для імітації сценаріїв динаміки розвитку інцидентів, що надає можливість проводити аналіз ефективності заходів щодо протидії кіберзагрозам, розробляти стратегії швидкого реагування для відновлення систем, а також використовувати результати моделювання для візуалізації еволюції стану системи, в тому числі для організації навчання персоналу.

#### Література

1. NetLogo: Resources and Links URL: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/resources.shtml>;
2. Introduction to NetLogo URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-5979-7\\_30](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-5979-7_30).
3. Vestad, A., & Yang, B. (2024). A survey of agent-based modeling for cybersecurity. *Human Factors in Cybersecurity*.

# Економічна політика розвитку ІТ-сфери: досвід Китайської Народної Республіки та українські реалії

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.061>

Валерія Перкальова

Київський національний економічний університет  
імені Вадима Гетьмана  
Київ, Україна  
valeriia.p2002@gmail.com

Тетяна Королук

Київський національний економічний університет  
імені Вадима Гетьмана  
Київ, Україна  
koroliuk.tetiana@kneu.edu.ua

**Анотація** — У статті розглядається розвиток ІТ-сфери в Україні, яка залишається важливим джерелом економічного зростання та макроекономічної стабільності. Особлива увага приділяється правовому режиму «Дія.City», що стимулює розвиток цифрової економіки та залучення інвестицій. Описано також досвід Китаю в розвитку високих технологій через програму "Made in China 2025" та впровадження національних стандартів кібербезпеки. Україна має потенціал для подальшого зростання в ІТ-секторі, але потребує додаткових заходів для стимулювання розвитку наукових досліджень, збереження кваліфікованих кадрів та створення інноваційної системи.

**Ключові слова** — ІТ-сфера, економічна політика, «Дія.City», цифрова економіка, розвиток технологій, Made in China 2025, кібербезпека, інновації, Україна, Китай, експорт ІТ-послуг, стимулювання людського капіталу, технологічний сектор.

## I. ЕКОНОМІЧНА ПОЛІТИКА РОЗВИТКУ ІТ-СФЕРИ В УКРАЇНІ

У 2023 році експорт ІТ-послуг України скоротився до 6,7 мільярдів доларів [1], що на 600 мільйонів доларів менше, ніж у 2022 році, коли показник досягав 7,3 мільярдів доларів. Незважаючи на цей спад, ІТ-сфера залишається однією з ключових рушій економіки та основним джерелом надходжень іноземної валюти. Це підтверджує стабільну роль індустрії у підтримці макроекономічної стабільності України, особливо в умовах війни та економічної дестабілізації. ІТ-компанії продовжують відкривати нові офіси, а кількість працівників в індустрії зростає, незважаючи на війну Росії проти України.

Крім того, частка ІТ у ВВП України у 2023 році залишається на рівні 4,9%. Це підкреслює важливість ІТ-сфери не лише для економічного розвитку, а й для соціальних аспектів, таких як створення нових робочих місць, зростання заробітної плати та підвищення загальної якості життя населення. Стрімка цифровізація державних процесів, зокрема через Єдиний портал державних послуг «Дія», сприяє підвищенню ефективності

роботи державних органів і поліпшенню сервісів для громадян. ІТ-сфера також є вагомим джерелом податкових надходжень до державного бюджету, що допомагає підтримувати соціальні програми і розвиток інфраструктури та сприяти поступовому відновленню України під час війни.

Одним із ключових елементів підтримки та розвитку ІТ-сфери наразі є правовий і податковий режим «Дія.City», (Дія Сіті). Цей режим був створений для стимулювання розвитку цифрової економіки через забезпечення сприятливих умов для ведення бізнесу в Україні. Закон України «Про стимулювання розвитку цифрової економіки», що регулює правовий та податковий режим «Дія.City», визначає головні напрями цієї ініціативи: створення сучасної цифрової інфраструктури, залучення інвестицій у технологічні сектори, а також стимулювання розвитку людського капіталу. «Дія.City» дозволяє ІТ-компаніям користуватися низкою податкових пільг і спрощених процедур, що стимулює їхній розвиток і залучає талановитих спеціалістів, зокрема з-за кордону.

Навіть в умовах війни українська ІТ-сфера продемонструвала високу стійкість та адаптацію до нових реалій. Багато компаній перейшли на віддалений формат роботи, що дозволяє їм продовжувати надавати послуги та залучати клієнтів з усього світу. Така гнучкість допомагає індустрії залишатися важливим елементом економічної підтримки України.

Однак, оскільки для України ІТ-сфера залишається відносно новою, але перспективною, доцільно розглянути додаткові шляхи стимулювання її розвитку. Одним із можливих прикладів є економічна політика Китайської Народної Республіки, спрямована на розвиток високих технологій, яка може стати орієнтиром для України. Незважаючи на складні політичні та дипломатичні відносини з Китаєм, варто врахувати передові технології та управлінські підходи, які КНР використовує для підтримки власних технологічних секторів. Досвід Китаю в модернізації промислового

потенціалу через стратегічне планування може стати цінним прикладом для України.

### II. ЕКОНОМІЧНА ПОЛІТИКА РОЗВИТКУ ІТ-СФЕРИ В КИТАЇ

За даними Bloomberg, частка ІТ-сфери в ВВП Китаю становила 14,3% у 2023 році [2], що підкреслює важливість високотехнологічних секторів у досягненні економічного зростання та глобальної конкурентоспроможності.

У 2015 році колишній прем'єр-міністр Китаю Лі Кецян запустив ініціативу «Made in China 2025» – «Зроблено в Китаї 2025» (MISC 2025) [3], яка націлена на трансформацію промислового потенціалу країни. Ця стратегія покликана зміцнити позиції Китаю як провідного гравця у високотехнологічних галузях, зокрема у робототехніці, авіації та виробництві нових енергетичних транспортних засобів, таких як електромобілі. MISC 2025 має на меті забезпечити Китаю довгострокову конкурентоспроможність на світовому ринку та зменшити залежність від імпорту іноземних технологій, сприяючи розробці власних інновацій.

Ключовим аспектом цієї програми є стимулювання досліджень і розробок (R&D), яке підкріплюється державними інвестиціями та пільгами для компаній, що займаються розробкою нових технологій. До 2025 року планується створення понад 40 національних і 48 провінційних інноваційних центрів, що сприятиме співпраці між державним і приватним секторами, підтримуючи розвиток ключових галузей.

Для підвищення якості продукції та міжнародної конкурентоспроможності, Китай активно впроваджує стандартизацію у ключових галузях, таких як кібербезпека та ІТ. Законодавство в цій сфері спрямоване на захист внутрішніх ринків від іноземної конкуренції, водночас забезпечуючи доступ до іноземних технологій шляхом регулювання. До того ж, Китай активно фінансує інноваційні галузі через державні банки та фонди. Наприклад, Китайський інвестиційний фонд індустрії інтегральних мікросхем надає значну фінансову підтримку для розробки нових технологій та продуктів. Важливою умовою для отримання фінансування є використання китайської інтелектуальної власності, що сприяє створенню технологічної бази, незалежної від імпортних рішень. Таке рішення допомагає розвиватися вітчизняному ІТ-бізнесу без втручання інших країн, що стимулює внутрішній ринок розвиватися та шукати нові підходи до модернізації обладнання, розробки нових технологій тощо.

Крім того, оскільки законодавство Китаю передбачає повний контроль за кібербезпекою та витоком інформації, країна зосереджена на розвитку кадрів, здатних впроваджувати та підтримувати високі стандарти в ІТ-індустрії. Стаття 2 Закону Китайської Народної Республіки «Про кібербезпеку» [4] чітко окреслює важливість залучення всіх ключових учасників — підприємств,

науково-дослідних установ, вищих навчальних закладів та мережевих галузевих організацій — до розробки і вдосконалення національних та галузевих стандартів. Це сприяє не лише створенню системи безпеки, але й підготовці фахівців, здатних забезпечити її ефективність. Такий підхід підкріплюється державною підтримкою програм навчання та перекваліфікації кадрів, а також розвитком дослідницьких центрів, які працюють над новими технологіями у сфері кіберзахисту. Китай активно інвестує в підготовку експертів у галузі кібербезпеки, розуміючи, що якісні кадри є запорукою успішного впровадження нових стандартів та забезпечення безпеки критичної інфраструктури. Створення спеціалізованих центрів і розширення навчальних програм на базі університетів також є пріоритетом у рамках цієї стратегії. Завдяки ній Китай зможе не лише зменшити свою залежність від іноземних технологій у сфері кібербезпеки, але й створити власну інноваційну систему, яка буде здатна конкурувати на світовому рівні.

Таким чином, Китай зосереджується на розвитку кібербезпеки та формування національної системи захисту даних. Законодавство у цій сфері, включно із Законом «Про кібербезпеку», передбачає інтеграцію всіх ключових акторів, таких як наукові установи, університети та компанії, для створення ефективної та стабільної системи кіберзахисту. Такий підхід забезпечує як технічну модернізацію, так і підготовку висококваліфікованих кадрів, що є важливою умовою для впровадження нових стандартів та підтримки інновацій в ІТ-секторі. А завдяки інвестиціям у навчальні програми та створенню спеціалізованих дослідницьких центрів Китай зможе не лише зміцнити свою внутрішню інфраструктуру безпеки, але й розвивати власні технологічні рішення, які здатні конкурувати на світовому ринку. Це дозволяє країні поступово зменшувати залежність від іноземних технологій і будувати повністю автономну та конкурентоспроможну ІТ-систему, що є однією з ключових цілей стратегії «MISC 2025».

### III. ВИСНОВКИ

Хоча Україна на шляху до становлення передовою державою у сфері ІТ, є ще багато питань, які варто вирішити, зокрема через відтік кадрів через війну та відкриття ІТ-компаній закордоном.

1) Україні варто створювати програми підтримки для науковців у сфері ІТ, працівників, компаній, оскільки підготовка кваліфікованих кадрів у цій сфері поки що залежить більше від приватного сектору, а також від власної ініціативи працівника, який шукає курси підготовки в ІТ сфері.

2) Україні варто зосередитися на збереженні вітчизняної ІТ сфери та кваліфікованих кадрів, щоб запобігти втраті талановитих спеціалістів. Для цього потрібно розробити національні програми підтримки та стимулювання ІТ-фахівців, які включатимуть державне фінансування досліджень, гранти на розробку інновацій, а також освітні



ініціативи для підвищення кваліфікації. Особливо важливим є співпраця держави з університетами та науковими інститутами для створення цілісної системи підготовки кадрів, яка б доповнювала ініціативи приватного сектору. Крім того, необхідно впроваджувати спеціальні програми для підтримки молодих спеціалістів, які розвивають стартапи, щоб вони залишалися працювати в Україні, тим самим посилюючи її технологічний потенціал і сприяючи відновленню економіки після війни.

3) І найголовніше – розробити довгострокову стратегію, яка дозволить Україні не тільки утримати своїх фахівців, але й активно виходити на міжнародний ринок з інноваційними IT-рішеннями. Така стратегія має включати розвиток експортного потенціалу вітчизняних IT-компаній через сприяння держави у створенні нових бізнес-моделей, розширенні міжнародних контактів та залученні іноземних інвестицій. Важливо також створювати систему підтримки стартапів, де державні та приватні інвестиції працюватимуть разом для

стимулювання інноваційних проєктів. Стратегія має враховувати інші ключові напрями, такі як цифровізація державних процесів, покращення регуляторного середовища для IT-компаній та адаптація освітніх програм до сучасних потреб ринку. Таким чином, Україна зможе не лише зберегти та розвинути своїх фахівців, але й стати конкурентоспроможною на глобальному рівні в сфері високих технологій

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Звіт, Національний Банк України, 2023 — Режим доступу до ресурсу: [https://bank.gov.ua/files/ES/Trade\\_m.pdf](https://bank.gov.ua/files/ES/Trade_m.pdf).
- [2] Том Ханкок, Bloomberg, 2024 — Режим доступу до ресурсу: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-03-25/china-s-tech-sector-may-rival-property-as-growth-driver-be-says>.
- [3] Institute of Security & Development Policy, Made in China 2025 — Режим доступу до ресурсу: <https://www.isdp.eu/publication/made-china-2025/>.
- [4] 中华人民共和国网络安全法, — Режим доступу до ресурсу: [https://www.gov.cn/xinwen/2016-11/07/content\\_5129723.html](https://www.gov.cn/xinwen/2016-11/07/content_5129723.html).

# Використання методів захисту даних в системах безпеки Unity застосунків

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.062>

Максим Поліщук  
 Поліський національний університет  
 Житомир, Україна  
 imyafamillllia2@gmail.com

**Анотація** — Зростання ігрової індустрії призвело до ускладнення розробки ігрових застосунків, через їх комплексність. Крім того, ігрові платформи стали ще більш привабливими для кібератак через значні прибутки від мікротранзакцій і обробку конфіденційної інформації. Це стало однією з основних причин зростання потреб в надійних заходах кібербезпеки в даній сфері. Метою даного дослідження є вивчення того, як різні методи захисту даних застосовуються в застосунках Unity, а також оцінка їх ефективності для визначення найкращих практик для реалізації функцій безпеки в даній сфері. Шляхом аналізу існуючих заходів безпеки в даному дослідженні оцінюється ефективність цих методів, визначаються їхні переваги та недоліки в контексті їх використання в системах безпеки застосунків на базі Unity. Результати демонструють, що для досягнення надійного захисту необхідний багаторівневий підхід, який поєднує заходи безпеки на стороні клієнта та на стороні сервера з урахуванням контексту проекту та його потреб.

**Ключові слова** — захист даних; кібербезпека; Unity Engine; шифрування; підробка пам'яті; захист від читів; аутентифікація

Розвиток ігрової індустрії за останні роки призвів до значного зростання кількості користувачів та збільшення доходів. Це у свою чергу призвело до ускладнення процесу розробки ігрових застосунків, оскільки вони дуже часто являють собою комплексні системи, що оперують з великими обсягами даних як в середині своєї інфраструктури, так і з залученням зовнішніх сервісів. Ігрові застосунки, що варіюються від однокористувачьких ігор до багатокористувачьких онлайн-платформ, є привабливими цілями для кібератак через значні доходи, які вони генерують завдяки внутрішньоігровим покупкам і мікротранзакціям, а також через конфіденційний характер даних, які вони обробляють, наприклад, особиста інформація користувачів, баланс внутрішньої валюти та історія транзакцій. Тому потреба в надійних заходах кібербезпеки при розробці ігор стала ще більш пріоритетною, ніж раніше.

Метою даного дослідження є вивчення того, як різні методи захисту даних застосовуються в застосунках Unity, а також оцінка їх ефективності для визначення найкращих практик для реалізації функцій безпеки в даній сфері.

Unity Engine – це багатоплатформовий інструмент для розробки відеоігор, який використовується для

створення та управління інтерактивним 2D та 3D-контентом в режимі реального часу. В якості основної мови програмування в Unity використовується мова C#.

Важливим аспектом створення застосунків у Unity є скриптинговий бекенд. Існує два його види: Mono та IL2CPP (Intermediate Language To C++), кожен з яких використовує різну техніку компіляції:

- Mono використовує компіляцію JIT і компілює код за вимогою під час виконання програми.

- IL2CPP використовує компіляцію AOT і компілює всю програму перед її запуском [1].

Різниця між Mono та IL2CPP з точки зору безпеки в першу чергу пов'язана з тим, як вони здійснюють виконання та компіляцію коду. IL2CPP є більш безпечним, ніж Mono, завдяки компіляції AOT в нативний машинний код, що ускладнює спроби реверсивної інженерії та втручання під час виконання. На практиці, Mono використовується в період розробки та прототипізації проекту, оскільки тестові збірки проекту з його використанням компілюються швидше, тоді як IL2CPP використовується для фінальних робочих збірок, де безпека та дотримання вимог платформ цифрової дистрибуції є пріоритетом.

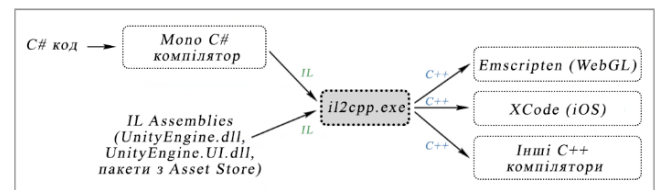


Рисунок 1. Схема роботи IL2CPP

Необхідність реалізації системи безпеки в застосунках на базі Unity існує через наявність таких потенційних загроз, що можуть вплинути як на процес користування застосунком, так і на безпеку даних та асетів компанії-розробника:

1. Загрози на стороні клієнту. Неналежне зберігання чутливих даних на стороні клієнту створює можливість доступу до них, їх витоку, або втручання в ігровий процес. Зазвичай до реалізації цієї загрози призводить використання інструментів для читингу та аналізаторів пам'яті, таких як Cheat Engine і GameGuardian, що можуть бути використані для пошуку та зміни даних застосунку.

Аналіз пам'яті – це пошук певного значення або шаблону в пам'яті, наданий відкритому (цільовому) процесу. Кінцевим результатом сканування є список адрес, який може бути уточнений (скорочений) додатковими скануваннями [2]. Використання даних

інструментів дозволить зловмисникам отримати певні переваги в межах ігрового середовища, наприклад, економічні, шляхом втручання у внутрішню економічну екосистему. Це може призвести до внутрішньої інфляції, економічних та репутаційних втрат, а також відштовхнути аудиторію від подальшого використання програмного продукту.

До методів захисту від даних видів загроз належать:

1) Шифрування конфіденційних даних у пам'яті застосунку. Полягає у шифруванні конфіденційних ігрових даних, таких як прогрес користувача, під час зберігання в пам'яті. Замість зберігання змінних у відкритому вигляді, зберігаються їх зашифровані версії, які розшифровуються лише тоді, коли це необхідно для внутрішніх обчислень [3]. Таким чином, навіть якщо зловмисник отримає доступ до локальних даних, їх буде неможливо прочитати.

Недоліком даного методу є можливий вплив на продуктивність, в залежності від частоти операцій шифрування та дешифрування даних.

2) Інтеграція античитингових інструментів, що дозволяють виявляти ін'єкції пам'яті або несанкціоновані зміни коду. До прикладів таких інструментів належать Easy Anti-Cheat та BattlEye. Вони активно запобігають ін'єкціям пам'яті та змінам коду гри під час виконання програми, але мають низку недоліків, таких як проблеми сумісності з деякими системами та зниження продуктивності застосунку.

2. Загрози на стороні серверу. До таких загроз належать, наприклад, ризик несанкціонованого доступу до конфіденційних даних користувачів, через відсутність належних заходів контролю доступу до БД. Також можлива модифікація пакетів, які надсилаються на сервер. Наприклад, шахрай може надати серверу фальшиві дані про себе або використати вразливості програми, через які сервер сліпо довіряє даним, які надходять від клієнта [4].

До методів захисту від даних видів загроз належать:

1) Принцип недовіри до клієнту. Є невід'ємним принципом розробки онлайн-ігор та будь-яких онлайн-сервісів. Наприклад, якщо клієнт надсилає пакет, який повідомляє серверу, що користувач намагається продати товар у магазині, сервер не повинен сліпо довіряти повідомленню та виконувати операцію продажу, яка дасть користувачу гроші. Замість цього сервер повинен виконати всі необхідні перевірки та валідації, наприклад, чи дійсно користувач має даний предмет і чи знаходиться він у правильному стані для цієї операції [4].

2) Механізми аутентифікації та авторизації користувачів з контролем доступу до БД. Використання надійних механізмів аутентифікації користувачів, таких як OAuth або Firebase Security Rules, гарантує, що лише авторизовані користувачі можуть отримати доступ до даних БД та мають відповідні дозволи для виконання таких дій, як читання та запис.

3) Шифрування мережевого трафіку. Коли дані передаються по мережі, за замовчуванням вони не шифруються, що означає, що будь-хто може отримати дані за допомогою таких інструментів, як Wireshark. Це не є гарантованим рішенням усіх проблем, але це ускладнить роботу для потенційних зловмисників. [4].

3. Незахищеність коду та асетів проекту. Окремо варто виділити необхідність у захисті проекту від реверсивної інженерії. Реверсивна інженерія програмного забезпечення – це підгалузь розробки програмного забезпечення, що пов'язана з аналізом існуючої системи програмного забезпечення з метою синтезу інформації про її цільові аспекти [5]. Вона дозволяє отримати доступ до вихідного коду проекту, пропрієтарних технологій та алгоритмів компанії. Це може призвести до крадіжки інтелектуальної власності, копіювання або викрадення коду реалізацій ігрових механізмів або цілих проектів. Крім того, якщо код застосунку легко піддається реверсивній інженерії, зловмисники можуть знаходити вразливі місця та здійснювати маніпуляції з кодом, шляхом перевизначення існуючих методів у коді, за допомогою написання власних функцій. Даний вид втручання у код застосунку називається “script hooking”.

Одним із способів мінімізації даної загрози є використання алгоритмів обфускації коду. Обфускатор – це компілятор, який перетворює будь-яку програму в обфусковану програму, яка має ті самі функції вводу-виводу, що й оригінальна програма, але є «нерозбірливою» для особи, що намагається прочитати її код. [6].

#### Висновок

Отже, розвиток ігрової індустрії призвів до ускладнення процесу розробки ігрових застосунків, через що потреба в надійних заходах кібербезпеки при розробці ігор стала ще більш пріоритетною, ніж раніше. Серед методів захисту даних в системах безпеки програмних застосунків на базі Unity виділено наступні:

- шифрування конфіденційних даних у пам'яті застосунку;
- інтеграція античитингових інструментів;
- принцип верифікації клієнту;
- механізми аутентифікації та авторизації користувачів з контролем доступу до БД;
- шифрування мережевого трафіку;
- використання алгоритмів обфускації коду.

Ефективність описаних заходів безпеки залежить від контексту та потреб проекту, в якому їх застосовують.

#### Література

1. Scripting backends. Unity Documentation. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/scripting-backends.html#:~:text=Mono%20uses%20just-in-time,application%20before%20it%20is%20run>
2. Cheat Engine: Memory Scanning. Cheat Engine Wiki. URL: [https://wiki.cheatengine.org/index.php?title=Cheat\\_Engine:Memory\\_Scanning](https://wiki.cheatengine.org/index.php?title=Cheat_Engine:Memory_Scanning)
3. Anti-Cheat Toolkit. URL: [https://codestage.net/uas\\_files/actk/api/class\\_code\\_stage\\_1\\_1\\_anti\\_cheat\\_1\\_1\\_storage\\_1\\_1\\_obsured\\_prefs.html](https://codestage.net/uas_files/actk/api/class_code_stage_1_1_anti_cheat_1_1_storage_1_1_obsured_prefs.html)
4. Lehtonen S. Comparative study of anti-cheat methods in video games. University of Helsinki, Faculty of Science, 2020. URL: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/89d7c14b-58e0-441f-a0de-862254f95551/content>
5. Müller H. A., & Kienle H. M. A small primer on software reverse engineering. University of Victoria, 2009. 18 c.
6. Goldwasser S., Rothblum G. N. On Best-Possible Obfuscation. Weizmann Institute of Science. 2007. 20c. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-70936-7\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-70936-7_11)

# Аналіз моделі прогнозування кіберзагроз «Cyber Kill Chain»

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.063>

Василь Сус  
Поліський національний університет  
Житомир, Україна  
Sus14012002@gmail.com

**Анотація** — Робота присвячена моделі Cyber Kill Chain, розробленій Lockheed Martin для аналізу та протидії кіберзагрозам. Модель включає ключові елементи кібератак, від розвідки до дій на об'єкті. У тезі розглянуто основні методи зловмисників і відповідні заходи захисту на кожному етапі. Обговорено переваги моделі, та її недоліки щодо нових типів загроз. Модель сприяє системному підходу до кібербезпеки і проактивному захисту.

**Ключові слова** — Cyber Kill Chain, кібератаки, захист, загрози, етапи атаки, контрзаходи, вразливості, кібербезпека.

Із появою нових ІТ-технологій зростає інтенсивність нових кібератак на ІТ-системи. Кібератаки стають все більш витонченими та поширеними. Розуміння методів, які використовують зловмисники, має вирішальне значення для розробки ефективних стратегій захисту. Cyber Kill Chain є одним із таких фреймворків, який допомагає аналізувати кіберзагрози та реагувати на них.

У цій тезі ми розглянемо етапи Cyber Kill Chain, найкращі методи, які використовують зловмисники, і стратегії пом'якшення наслідків для захисту від кібератак.

Cyber Kill Chain — це модель, розроблена компанією Lockheed Martin у 2011 році. В умовах зростаючого числа складних кібератак і появи нових типів загроз компанії потребували систематизованого підходу до аналізу та протидії атакам. Lockheed Martin застосувала концепцію kill chain (ланцюг знищення), що використовується у військових операціях для опису послідовності дій, необхідних для успішного нападу на противника. Військовий ланцюг складався з етапів розвідки, націлювання, атак і завершення місії.

Модель Cyber Kill Chain, є частиною концепції Intelligence Driven Defense для ідентифікації та запобігання кіберзагрозам. Модель була представлена таким чином, що складається з семи етапів: розвідка, озброєння, доставка, експлуатація, встановлення, командування та контроль та дії на об'єкті [1].

Таблиця 1- Етапи моделі Cyber Kill Chain

№	Етапи	Опис
1	Розвідка	Дослідження, ідентифікація та вибір цілей для атаки
2	Озброєння	Підготовка зброї для атаки за допомогою автоматизованих інструментів
3	Доставка	Доставка кіберзброї до цільової системи
4	Експлуатація	Активація кіберзброї
5	Встановлення	Встановлення шкідливого програмного забезпечення на цільовій системі
6	Командування та контроль	Встановлення каналу для віддаленого управління цільовою системою
7	Дії на об'єкті	Досягнення кінцевих цілей (збір інформації, знищення системи тощо)

У компанії Lockheed Martin кібератака проходить через серію чітко визначених етапів або процесів, кожен з яких є необхідним для успішного завершення атаки. Якщо захисник зможе заблокувати хоча б один із цих кроків, зловмисник не зможе перейти до наступного етапу, що порушить всю атаку і зробить її неефективною. Цей підхід базується на ідеї про те, що кібератаки — це складні та багатоступеневі операції, які потребують точного виконання кожного етапу для досягнення мети. Відповідно, кожен етап атаки — від збору інформації та підготовки інструментів до встановлення контролю і виконання злочинних дій — може бути ціллю для контрзаходів.

Для кожного етапу моделі “Cyber Kill Chain” компанії Lockheed Martin існують відповідні контрзаходи, які можуть ефективно зупинити атаку. На етапі розвідки важливо використовувати системи виявлення вторгнень (IDS) та моніторинг мережевого трафіку для виявлення підозрілої активності. На етапі озброєння необхідно мати актуальне антивірусне програмне забезпечення та регулярно оновлювати системи безпеки. Доставка шкідливого програмного забезпечення може бути заблокована за допомогою фільтрації електронної пошти та використання брандмауерів. Експлуатація вразливостей може бути запобігнута впровадженням патчів безпеки та обмеженням прав доступу. Встановлення шкідливого програмного забезпечення можна запобігти за

допомогою антивірусного програмного забезпечення та моніторингу систем. На етапі командування та контролю важливо використовувати системи виявлення вторгнень та моніторинг мережевого трафіку. Нарешті, на етапі дій на об'єкті необхідно використовувати системи виявлення вторгнень (IDS), моніторинг систем та навчання співробітників щодо безпеки. На рисунку 1 зображено впровадження контрзаходів в моделі Cyber Kill Chain на етапі Експлуатація та розвиток поточної кібератаки на основі моделі.

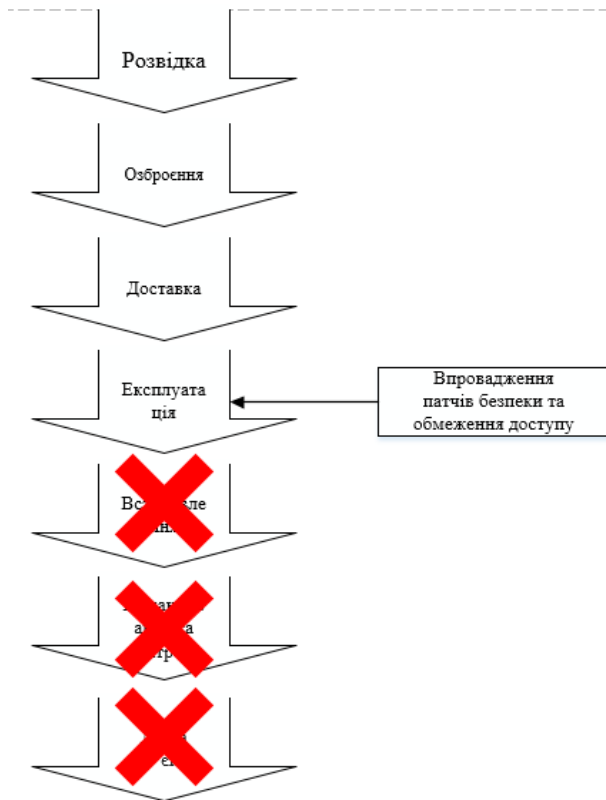


Рисунок 1 Впровадження контрзаходів в моделі Cyber Kill Chain

До переваг моделі Cyber Kill Chain можна віднести чітку структуру процесу кібератаки, що дозволяє систематично аналізувати загрози та забезпечувати ефективні заходи для їхнього блокування на кожному з етапів. Модель сприяє проактивному підходу до захисту, що дає змогу запобігати атакам до того, як вони завдадуть шкоди. Крім того, вона дозволяє організаціям краще зрозуміти тактики зловмисників та забезпечити координацію між різними підрозділами з кібербезпеки.

Серед недоліків можна виділити те, що модель орієнтована на відомі типи атак і може бути менш ефективною проти нових, інноваційних загроз, які використовують інші методи або обходять стандартні етапи. Крім того, деякі зловмисники можуть модифікувати свої техніки для уникнення виявлення на етапах, описаних у моделі, що ускладнює своєчасне реагування.

## Висновок

Модель Cyber Kill Chain є потужним інструментом та надає організаціям можливість проактивного підходу до безпеки, оскільки кожен етап моделі допомагає виявляти слабкі місця в системах захисту та прогнозувати потенційні загрози. Шляхом детального аналізу кожного етапу атаки, модель дає змогу передбачати, які методи зловмисники можуть використовувати, і створювати відповідні засоби захисту. Вона також допомагає організаціям зосередитися на послідовному вдосконаленні своїх заходів кібербезпеки, орієнтуючись на конкретні етапи кіберзагроз, що підвищує стійкість до атак.

## Література

1. Lockheed Martin, The Cyber Kill Chain. URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/cyber/cyber-kill-chain.html>
2. Протидія кіберзагрозам URL: [Як протидіяти кіберзагрозам та захистити системи від ворожих кібератак – важливі рекомендації та допомога CERT-UA | Кабінет Міністрів України \(kmu.gov.ua\)](#)
3. Pols, Paul (17 травня 2021). The Unified Kill Chain. [UnifiedKillChain.com](#).



# Алгоритми консенсусу у Blockchain корпоративних системах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.064>

Юрій Тулашвілі

Луцький національний технічний університет  
Луцьк, Україна  
y.tulashvili@lutsk-ntu.com.ua

Юрій Лук'янчук

Луцький національний технічний університет  
Луцьк, Україна  
iuriilukianchuk87@gmail.com

**Abstract** – The concept of the new generation of the Internet is based on decentralization and today is widely implemented in cryptocurrency tokens and information systems based on blockchain technology. The purpose of the article is to investigate the impact of algorithms for confirming the authenticity of information on the effectiveness of the functioning of corporate information systems using blockchain technology through the analysis of existing concepts of consensus. The scheme of the corporate information system of document circulation proposed by the authors of the article in previous works using blockchain technology is based on ensuring the decentralization of the system and the integrity of data regarding the preservation and revision of the institution's documents. To automate the consensus process using a smart contract, the system uses a dynamic consensus.

**Keywords** – blockchain technology; consensus process; corporate information system of document circulation

## I. ВСТУП

Блокчейн сьогодні являє собою нову прогресивну технологію Web 3.0, яка дає користувачам більше контролю над своїми даними та забезпечує більш відкрите та прозоре середовище обміну інформацією. У Web 3.0 немає єдиного центру управління, у цілому мережа контролюється самими учасниками. Концепція нового покоління інтернету заснована на децентралізації та сьогодні широко реалізується у криптовалютних токенах та інформаційних системах на технології блокчейн.

Основна ідея блокчейн заснована на тому, щоб забезпечити гарантії цілісності даних без опори на керуючий мережею центр шляхом децентралізованого зберігання інформації. Вся інформація та дані зберігаються в учасників мережі, які є розподіленими вузлами, а не в централізованому центрі керування. Яскравими прикладами нового децентралізованого підходу є криптовалютні системи та корпоративні інформаційні системи, що побудовані на технології блокчейн, які працюють на основі децентралізованого реєстру транзакцій, що забезпечує надійність, прозорість і безпеку обміну даними та активами між учасниками.

Оскільки блокчейн є мережевою технологією, то для успішного функціонування поставлених завдань у корпоративній системі мають приймати всі

учасники. Технологія ґрунтується на забезпеченні гарантії того, що дані залишаються однаковими на всіх вузлах. Це створює довіру між сторонами, що ведуть бізнес, навіть коли вони не знають один одного. Вся ідея блокчейну полягає в тому, щоб забезпечити гарантії цілісності даних без опори на центральний авторитет та забезпечити достовірність інформації, що зберігається у блоках. У процесі підтримання цілісності інформації за технологією блокчейн значну роль відіграє операція консенсусу, яка застосовується для прозорого підтвердження достовірності інформації. Метою статті є дослідити вплив на ефективність функціонування корпоративних інформаційних систем, що використовують технологію блокчейн, алгоритмів підтвердження достовірності інформації через аналіз існуючих концепцій консенсусу.

## II. СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ

Технологія блокчейн характеризується декількома особливостями, які роблять її унікальною: децентралізацією (жоден суб'єкт не має повного контролю над блокчейном), консенсусом (щоб додати транзакцію до блокчейну, інші вузли повинні надати згоду), криптографією (блокчейн використовує криптографічні пристрої для захисту транзакцій у блокчейні від злому) і незмінністю (як тільки транзакція було додано до блокчейну, її неможливо змінити чи видалити – можна додавати лише нові транзакції).

Достовірність інформації є основною перевагою функціонування інформаційних систем на основі блокчейн і, у свою чергу, ґрунтується на принципах консенсусу та незмінності. Дотримання цих принципів гарантує, що всі дані в мережі є однаковими та недоступними до змін без погодження. Технологія блокчейн використовує алгоритми консенсусу (правила узгодження) для досягнення єдності серед всіх учасників-вузлів щодо стану кожної транзакції та реєстру транзакцій, який і є безпосередньо сам блокчейн. Це гарантує, що всі дані в мережі є однаковими та недоступними до змін без погодження. Найбільш поширеними правилами консенсусу, що застосовуються у технології блокчейн є алгоритми економічного стимулювання: Proof of Work (PoW - «доказ роботи»); Proof of Stake (PoS - «підтвердження частки») та їх модифікації [1, 2], а також алгоритми математичних обчислень

гарантій безпеки на основі Byzantine Fault Tolerance (BFT - «Візантійська стійкість до відмов») [3, 4].

Проведений дослідниками [1-3, 5, 6] аналіз алгоритмів економічного стимулювання висвітлює, що на сучасному етапі більшість систем, які базуються на технології блокчейн, використовують широку гаму алгоритмів консенсусу. Алгоритм консенсусу доказ роботи proof-of-work (PoW) поширився завдяки біткойну та є найвідомішим способом підтвердження транзакцій. Основна ідея полягає в тому, що вузли мережі блокчейн (майнери), які підтверджують транзакції, повинні виконувати досить складну обчислювальну роботу (обчислення алгоритму), результат якої був би легко і швидко перевірений іншими вузлами мережі. Перший вузол-майнер, який виконає всі необхідні обчислення, винагороджується мережею блокчейн. Всі вузли ведуть боротьбу між собою, збільшуючи пропускну здатність обчислювальних ресурсів, щоб першим отримати винагороду. Процес майнінгу, у якому майнери - дуже потужні комп'ютери, під'єднані до мережі - змагаються за вирішення складних математичних задач. У нагороду за свої зусилля вони отримують новостворені монети. Головними недоліками цього алгоритму є: атаки на існуючі блокчейни коли майнери можуть намагатися здійснювати корисливий майнінг (зловмисник може спробувати подвоїти витрати, використовуючи ту саму монету для здійснення більше транзакцій, щоб збільшити свою відносну частку майнінгу в блокчейні); - витрати на електроенергію, а саме, велика кількість вузлів виконують обчислення, але в реальності тільки один, перший, виконує успішну роботу і отримує винагороду.

Для подолання проблем PoW був розроблений новий механізм консенсусу, а саме доказ частки володіння (PoS), який дозволяє досягти консенсусу шляхом доведення права власності на частку [2]. За цим алгоритмом творцем наступного блоку в блокчейні вибирається вузол, який має більший баланс - кількість ресурсів, наприклад, монет у криптовалюти. Вузол не отримує винагороду за створення самого блоку. За проведення транзакції виплачується винагорода. Основним недоліком цього алгоритму є нерівномірність виплачених винагород майнерам, що створює прецедент збагачення одних і тих же вузлів криптовалютного блокчейну.

Спробою виправити цей недолік є алгоритм Delegated Proof-of-Stake (DPoS), один з різновидів алгоритму консенсусу Proof-Of-Stake, у якому користувачі все ще роблять ставки своїх криптовалютних монет. Однак замість того, щоб самостійно брати на себе відповідальність за перевірку блоку, користувачі (або зацікавлені сторони) роблять ставки своїх монет, щоб делегувати роботу, голосуючи за вузол, який перевірить блок від їх імені. Таким чином такий механізм консенсусу отримав назву «делеговане підтвердження частки».

Також знаходять застосування проаналізовані в працях [2, 6, 8, 9] алгоритми консенсусу, що базується на комбінації Proof of Work і Proof of Stake: підтвердження активності Proof of Activity

(PoA); підтвердження ємності Proof-of-Capacity (PoC); доказ горіння Proof-of-Burn (PoB); орендований доказ Leased Proof-of-Stake (LPoS); доказ важливості Proof-of-Importance (PoI); сімейство консенсусних протоколів підтвердження частки Ouroboros. При тому, що усі алгоритми консенсусу мають як свої переваги, так й недоліки їх застосовують різні криптовалютні системи на основі технології блокчейн (Bitcoin, Ethereum, Stellar, Chia, Slimcoin, Decred, Dash, Qtum, NEO).

Проведений дослідниками [10-16] аналіз висвітлює, що у блокчейн мережах з обмеженою кількістю учасників, як це є у корпоративних системах, немає сенсу використовувати непродуктивні та повністю розподілені типи консенсусів, на кшталт Proof of Work і Proof of Stake. Це дає завжди збільшення вартості проведення та зберігання транзакцій: одна справа зберігати транзакцію на десятках корпоративних вузлах, а зовсім інша - на сотнях тисяч у всьому світі, як у криптовалютних системах. Тому для таких систем найбільшої ефективності для забезпечення достовірності інформації набувають алгоритми консенсусу на основі математичних обчислень гарантій безпеки, які розглянемо з погляду застосування для корпоративних систем.

### III. ОСНОВНИЙ ВИКЛАД

Алгоритми математичних обчислень гарантій безпеки застосовують консенсус на основі BFT. Такий підхід заснований на тому, що з  $n$  вузлів мережі блокчейн може виникати кількість учасників системи  $t$ , які можуть відхилитись від специфікації протоколу, тобто коли деякі вузли мережі не відповідають або дають неправильну інформацію.

Алгоритм BFT побудований на розв'язанні задачі «Візантійських генералів». Її рішення лежить в основі стійкості P2P мереж, коли вузли обмінюються між собою файлами і зберігають один і той же набір даних. За BFT можливість приходити до консенсусу під час голосування гарантує цілісність реєстру, його послідовність і живучість, якщо є згода понад двох третин всіх вузлів, тобто припускається кількість візантійських спотворень

$$t < n/3. \quad (1)$$

Тоді, усі «чесні» вузли можуть отримати миттєву впевненість у тому, що транзакція в кінцевому підсумку буде виконана.

Алгоритм BFT знайшов свій розвиток у таких протоколах консенсусу:

- Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) - це оригінальний класичний консенсусний протокол, який використовує 2 раунди голосування. Алгоритм реалізує такі кроки [10]:

- вузол надсилає запит на виклик операції служби узгодження;

- служба узгодження передає запит до повних вузлів, що мають резервні копії блокчейну та примають участь у консенсусі;

- повні вузли опрацьовують запит і надсилають відповідь вузлу, що ініціював запит;

- вузол чекає  $n/3+1$  відповіді від  $n$  повних вузлів з однаковим результатом, це є результат операції узгодження.

PBFT був розроблений для ефективно роботи в асинхронних мережах і оптимізований для зниження накладних витрат [11].

- Istanbul BFT (IBFT), простий і елегантний візантійський відмовостійкий консенсусний алгоритм, який використовується для реалізації реплікації кінцевого автомата в блокчейні Quorum [12]. IBFT перейняв з алгоритму PBFT трифазний консенсус, що складається з етапів *PRE-PREPARE*, *PREPARE* та *COMMIT* [13]. Система допускає не більше  $t$  несправні процеси з  $n$ , а саме реалізує умову  $n = 3t+1$ . Алгоритм є детермінованим, заснованим на лідері (рис.1).

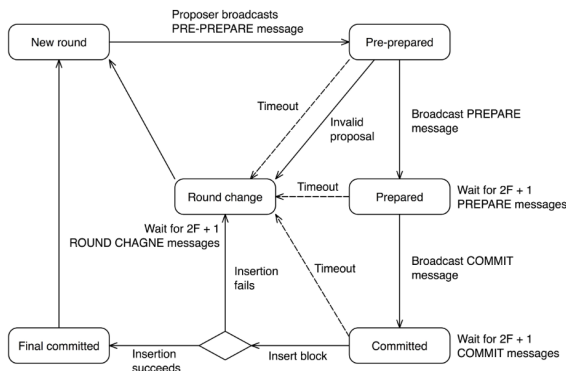


Рис.1. Процес взаємодії валідаторів у IBFT [13]

Перед кожним раундом вузли, що виконують роль валідаторів, обирають одного з них на роль лідера. Вибраний лідер пропонує нову пропозицію з транзакціями для включення в ланцюжок блокчейну та передає її валідаторам спільно з повідомленням *PRE-PREPARE*. Після отримання *PRE-PREPARE* повідомлення валідатори змінюють свій стан на *PRE-PREPARED*. Після здійснення цієї дії всі вузли повинні переконатися, що всі валідатори працюють в одній послідовності та в тому самому раунді. Після отримання валідатором  $2t+1$  повідомлень *PREPARE* він набуває нового стану *PREPARED* і потім передає повідомлення *COMMIT*. На цьому кроці валідатор повідомляє своїм партнерам про те, що він приймає запропонований блок і збирається додати його в ланцюжок. Дочекавшись  $2t+1$  повідомлень *COMMIT*, валідатори переходять у стан *COMMITTED* і додають новий блок у ланцюжок.

- Delegated Byzantine Fault Tolerant (DBFT) розроблено на основі механізму PBFT командою NEO. Він поєднує характеристики протоколів PBFT і DPoS. Кожен користувач у ланцюжку блоків NEO може вибрати делегатів. Як показано на рис. 2, у моделі системи DBFT є три сторони, включаючи кандидатів, радників і звичайні вузли [14]. Кандидати обираються з усіх вузлів у системі блокчейн на початку процесу консенсусу. Оскільки вони можуть представляти інтереси більшості вузлів, вони сформулюють альтернативний пул вузлів, які

виконують PBFT. Радники: у кожному циклі виконання члени ради вибираються з кандидатів за допомогою алгоритму випадкового вибору (RS). Вони відповідають за реалізацію алгоритму PBFT для досягнення консенсусу. Основні та резервні копії в PBFT обираються з членів ради. Звичайні вузли: усі вузли, крім кандидатів і радників.

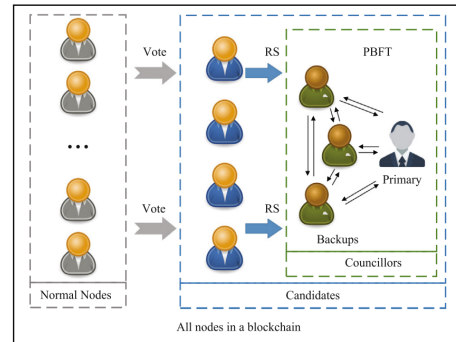


Рис.2. Процес взаємодії валідаторів у IBFT [14]

- Verifiable Byzantine Fault Tolerance (VBFT) - новий алгоритм консенсусу, який поєднує в собі класичний PoS, випадкову функцію (VRF), що перевіряється, і візантійську відмовостійкість (BFT) [16]. VBFT розроблено для забезпечення високої пропускної здатності, низької затримки та візантійської відмовостійкості при збереженні безпеки та децентралізації. Даний механізм розроблений спеціально для потреб платформи ONTology. VBFT може підтримувати масштабованість консенсусних груп, за допомогою VRF гарантує випадковість та справедливість генерації консенсусної сукупності, а також забезпечує швидке досягнення кінцевого стану. На відміну від DBFT, у цьому алгоритмі усунуто проблему ризику централізації. Послідовність VBFT [16]:

- вибір консенсусного вузла: для участі в процесі консенсусу вибирається фіксована кількість вузлів консенсусу, також відомих як учасники консенсусу або валідатори. Вибір консенсусних вузлів може базуватися на таких факторах, як частка, репутація або інші критерії, визначені мережею.

- пропозиція та перевірка: процес консенсусу починається, коли призначений вузол консенсусу пропонує новий блок транзакцій. Інші вузли консенсусу в мережі отримують запропонований блок і незалежно перевіряють його достовірність за допомогою криптографічних методів.

- верифікована випадкова функція (VRF): VBFT містить перевірену випадкову функцію (VRF) для вибору підмножини консенсусних вузлів для участі в процесі перевірки блоку. VRF забезпечує випадковість і справедливість у виборі консенсусних вузлів, запобігаючи маніпуляціям або упередженням у процесі консенсусу.

- голосування та погодження: після перевірки запропонованого блоку вузли консенсусу

віддають свої голоси, щоб схвалити або відхилити блок. Попередньо встановлений поріг позитивних голосів потрібен, щоб блок вважався підтвердженим і доданим до блокчейну.

#### IV. ВИСНОВКИ

Існуючі корпоративні інформаційні системи не можуть продовжувати працювати відповідно до традиційних вимог транзакцій. Їх доведеться модифікувати до сучасних вимог з інтегруванням технології блокчейну. Корпоративні інформаційні системи включатимуть блокчейни, що міститимуть вичерпні дані щодо існуючих сховищ даних, забезпечать асинхронну взаємодію усіх учасників системи у вигляді розподілених вузлів блокчейну.

Запропонована авторами статті у попередніх роботах схема корпоративної інформаційної системи документообігу [17] з використанням технології блокчейн ґрунтується на забезпеченні децентралізації системи та цілісності даних щодо збереження та перегляду документів установи. Для автоматизації процесу консенсусу за допомогою смарт-контракту система застосовує алгоритм динамічної згоди, який ґрунтується на протоколі консенсусу BFT. Вузол, що здійснює транзакцію повинен за певними правилами, які визначені у таблиці правил, провести її за погодження між іншими вузлами, після чого створюється та додається новий блок до блокчейну. В залежності від того, яка транзакція відбулась - запит даних чи завантаження документу до хмарного сховища, буде сформований блок до блокчейну запитів чи блок до блокчейну даних. Вузли взаємодіють між собою та сховищем даних, що дає можливість підтримувати цілісність мережі та отримувати інформацію щодо оновлення документів в корпоративній інформаційній системі шляхом синхронізації блокчейну. Операція включення до блокчейну нового блоку потребує його узгодження іншими вузлами за правилами консенсусу.

У подальшому впровадження та дослідження корпоративної інформаційної системи документообігу передбачає порівняльне дослідження ефективності алгоритмів динамічної згоди, протоколів BFT для розробки ефективніших і результативних методів захисту механізмів блокчейну.

У подальшому дослідження та впровадження корпоративної інформаційної системи документообігу передбачає порівняльне дослідження ефективності алгоритмів криптографічного захисту транзакцій у блокчейні від злому.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Don Tapscott, Alex Tapscott. Blockchain Revolution. How the technology behind Bitcoin is changing money, business, and the

world. Penguin Random House LLC, New York, 2016. P. 324. URL: [https://itig-iraq.iq/wp-content/uploads/2019/05/Blockchain\\_Revolution.pdf](https://itig-iraq.iq/wp-content/uploads/2019/05/Blockchain_Revolution.pdf).

- [2] Cong Nguyen, Hoang Dinh Thai, Diep N. Nguyen, Dusit Niyato and others. Proof-of-Stake Consensus Mechanisms for Future Blockchain Networks: Fundamentals, Applications and Opportunities. June 2019 IEEE Access. 7. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925010..>
- [3] Miguel Correia. From Byzantine Consensus to Blockchain Consensus. 2019. URL: <https://www.dpss.inesc-id.pt/~mpc/pubs/Chapter-From-Byzantine-Consensus-to-Blockchain-Consensus.pdf>.
- [4] Kiayias Aggelos, Russell Alexander. Ouroboros-BFT: A Simple Byzantine Fault Tolerant Consensus Protocol. Cryptology ePrint Archive (Report 2018/1049). Retrieved November 23, 2020. URL: <https://eprint.iacr.org/2018/1049>.
- [5] Kirill Grigorchuk. Overview of 9 blockchain consensus algorithms. DigitalForest Blog. 2019. URL: <https://digiforest.io/en/blog/blockchain-consensus-algorithms>.
- [6] Arthur Gervais, Ghassan Karame, Karl Wüst, Vasileios Glykantzis. On the Security and Performance of Proof of Work Blockchains. 2016. URL: [https://www.researchgate.net/publication/309451429\\_On\\_the\\_Security\\_and\\_Performance\\_of\\_Proof\\_of\\_Work\\_Blockchains](https://www.researchgate.net/publication/309451429_On_the_Security_and_Performance_of_Proof_of_Work_Blockchains).
- [7] Kebira Azbeg, Ouail Ouchetto, Said Jai Andaloussi, Laila Fetjah. An Overview of Blockchain Consensus Algorithms: Comparison, Challenges and Future Directions. Advances in Intelligent Systems and Computing. October 2020. Springer. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6048-4\\_31](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6048-4_31).
- [8] Кучковський В. В. Алгоритми консенсуса блокчейн систем. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. № 3 (297), 2021. С. 30–33.
- [9] Kiayias Aggelos, Russell Alexander, David Bernardo, Oliynykov Roman. Ouroboros: A Provably Secure Proof-of-Stake Blockchain Protocol. In Katz, J.; Shacham, H. (eds.). Advances in Cryptology – Crypto 2017. Cham: Springer. pp. 357–388. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-63688-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63688-7_12).
- [10] CASTRO, M. AND LISKOV, B. 1999b. Practical Byzantine fault tolerance. In Proceedings of the Third Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI), USENIX, New Orleans, USA, February 1999. URL: <https://pmg.csail.mit.edu/papers/osdi99.pdf>.
- [11] What Is Zilliqa (ZIL)? Binance Academy. URL: <https://academy.binance.com/uk/articles/what-is-zilliqa-zil>.
- [12] Henrique Moniz. The Istanbul BFT Consensus Algorithm. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.03613>.
- [13] Istanbul Byzantine Fault Tolerance. URL: <https://github.com/ethereum/EIPs/issues/650>.
- [14] Yu Zhan, Baocang Wang, Rongxing Lu, Yong Yu. DRBFT: Delegated randomization Byzantine fault tolerance consensus protocol for blockchains. Information Sciences. Volume 559, June 2021, Pages 8-21. URL: <https://www.cs.unb.ca/~rlu1/paper/ZhanWLY21.pdf>.
- [15] Pierre Tholoni, Vincent Gramoli. Formal Verification of Blockchain Byzantine Fault Tolerance. URL: [https://www.researchgate.net/publication/342079183\\_Forma\\_Verification\\_of\\_Blockchain\\_Byzantine\\_Fault\\_Tolerance](https://www.researchgate.net/publication/342079183_Forma_Verification_of_Blockchain_Byzantine_Fault_Tolerance).
- [16] Garima Singh. Verifiable Byzantine Fault Tolerance (VBFT) consensus. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/verifiable-byzantine-fault-tolerance-vbft-consensus-garima-singh-t9bhf>.
- [17] Тулашвілі Ю.Й., Лук'яничук Ю.А. Перспективи розвитку технології blockchain у корпоративних інформаційних системах. Комп'ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій : зб. наук. праць IV Міжнародної науково-практичної конф. КМПЗ 2024. Чернівці, 30 травня – 01 червня 2024. Львів: ЛІНУ імені Івана Франка, 2024. С.293-297.



***СЕКЦІЯ 6  
МАТЕМАТИЧНЕ, КОМП'ЮТЕРНЕ  
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ  
МЕТОДИ***



# Framework for Dataset Development in Building Energy Balance Simulations

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.065>

Svitlana Alyokhina

Department Industrial Engineering  
University of Applied Sciences Technikum Wien  
Vienna, Austria  
svitlana.al yokhina@technikum-wien.at

Natalia Orlova

Department of Modeling and Identification of Thermal  
Processes in Energy Technology Equipment  
Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and  
Systems of the National academy of sciences of  
Ukraine  
Kharkiv, Ukraine

**Abstract**— The article presents a structured approach to forming initial datasets necessary for calculating the energy balance of buildings, tailored to the district's level of digitalization. The methodology outlined addresses the often-neglected step of data preparation, which critically influences the outcomes of energy balance simulations. Two distinct process flows for dataset formation are introduced, reflecting high and medium levels of district digitalization. The paper's novelty lies in formalizing the dataset creation process, enabling more accurate energy simulations, particularly in the early planning stages of positive energy districts.

**Keywords**— energy balance, building, process flow, digitalization, simulation

## I. INTRODUCTION

Building energy balance calculations and simulations are crucial for understanding and optimizing energy usage in living districts and cities [1], [2], etc. By identifying areas of inefficiency, these calculations enable targeted improvements, leading to reduced energy consumption and lower utility costs. This promotes sustainability, as it allows for the integration of renewable energy sources and green building practices, contributing to environmental conservation and a smaller carbon footprint. Efficient energy use not only lowers operational costs but also enhances inhabitants' comfort, productivity, and well-being. Buildings designed or renovated with a focus on energy balance tend to retain their value over time, making them more attractive in the real estate market. In essence, building energy balance calculations are fundamental for achieving energy efficiency, sustainability, cost savings, occupant comfort, and long-term asset value in the built environment.

With the growing emphasis on sustainable development and energy efficiency, accurately modeling and simulating the energy balance of buildings is critical. Energy balance simulation allows optimization of building designs to achieve higher energy efficiency and reduce carbon footprints. With increasing complexity in building design and environmental factors, the need for sophisticated and dynamic dataset preparation methods is more pressing than ever.

## II. ACTUALITY

Accurate dataset preparation is essential for constructing energy balance simulations, which are used to optimize energy consumption in buildings and urban environments. A series of studies have been conducted on this topic, and a brief analysis of some of them is presented below.

In the study [3] developed a 3D Building Energy Model (BEM) dataset generation framework that leverages human-AI synergies in early-stage building design. This approach addresses the challenge of manually creating 3D models by incorporating machine learning and artificial intelligence (AI) into the dataset preparation process, which accelerates the development of high-performance buildings. One of the primary advantages of this method is its ability to handle complex datasets that combine manual and automated processes, reducing human error and time. However, this method is resource-intensive and requires expertise in AI, making it less accessible to smaller firms or individuals without computational resources.

EnergyPlus is a widely used energy simulation program that supports dataset preparation through a comprehensive collection of environmental data, including climate data like TMY2 (Typical Meteorological Year). Developed by Crawley et al. [4], it provides detailed models for heating, cooling, and ventilation systems within buildings. The strength of EnergyPlus lies in its accuracy and the large dataset library available for simulation, making it ideal for robust energy balance models. However, the complexity of the tool and its steep learning curve present significant barriers to widespread adoption, particularly for non-specialists.

Oraiopoulos and Howard [5] examined the accuracy of Urban Building Energy Modelling (UBEM). The study highlights the complexity of scaling energy balance simulations from individual buildings to urban environments, where the interactions between multiple buildings influence the overall energy use. While UBEM is valuable for studying large-scale urban environments and their collective energy needs, the model often suffers from accuracy issues related to scaling errors. These arise from the complexity of urban

form and the interactions between buildings, climate, and energy systems.

Vartholomaïos and Chatzidimitriou [6] applied Monte Carlo dynamic energy simulations to explore the thermal loads of urban buildings. By simulating different parameters and variations in building design, their method offers insights into how different building forms impact energy efficiency. The Monte Carlo method is beneficial for its robustness in handling uncertainty and variability in input data. However, this approach requires substantial computational power and complex dataset handling, which may be a disadvantage in real-world applications where resources are limited.

Labiadh [7] proposed the use of in building energy simulations, which dynamically adjust parameters in response to changes in the environment and building use. These models offer a more flexible and responsive way to simulate energy balance, as they account for real-time variations in energy demand. However, the limitation of this approach is the difficulty in scaling to larger datasets or complex urban environments, as the adaptability of the model may not function effectively across diverse building types.

Zhao [8] explored the use of artificial intelligence and machine learning models for energy consumption analysis in large buildings. AI-driven models improve the efficiency and accuracy of energy balance simulations by recognizing complex patterns in the dataset that traditional methods may overlook. While these models significantly enhance prediction capabilities, they require extensive datasets and computational resources, limiting their accessibility for smaller projects.

The studies reviewed demonstrate that dataset preparation is crucial for accurate building energy balance simulations, particularly as energy efficiency becomes a global priority. Advances in artificial intelligence and adaptive modeling have significantly improved the ability to handle large, complex datasets. However, computational intensity and the requirement for specialized knowledge remain common drawbacks across many methods. Tools like EnergyPlus offer robust datasets but may be difficult to use without expert training, while AI-driven approaches bring adaptability but also introduce new complexities in terms of data requirements and accessibility.

### III. PROBLEM FORMULATION

The current framework for dataset development in building energy balance simulations must address several key challenges to remain relevant and effective:

- **Diverse Building Types:** Modern urban environments feature a broad array of building designs, materials, and technologies. Simulations require datasets that capture this diversity to produce accurate energy predictions across different contexts.
- **Dynamic and Real-Time Data:** Energy consumption patterns are not static; they vary with occupancy, external weather conditions, and operational changes. The framework must include adaptive datasets that can dynamically

adjust to these real-time variables for more precise simulations.

- **Climate Sensitivity:** Buildings in different geographic regions face unique climate challenges. The framework should incorporate climate-specific data (e.g., temperature, humidity, solar radiation) to accurately model energy interactions, particularly in heating and cooling systems.
- **AI and Machine Learning Integration:** Traditional datasets often fall short in capturing complex, multi-variable interactions between building systems and their environments. By incorporating AI and machine learning, the framework can process large volumes of data, identify patterns, and optimize the energy balance simulation process.
- **Scalability from Single to Urban Models:** As the focus on urban sustainability grows, the framework should allow scalability, enabling simulation not only for individual buildings but also for entire urban clusters, considering interactions between multiple buildings and the surrounding environment.

The purpose of this study is to formalize the main stages and highlight features of dataset forming for building energy balance simulation.

### IV. METHODS

The paper utilizes a structured methodology to create flow diagrams and define roles in the initial dataset formation for energy balance calculations of buildings, with variations based on the region's level of digitalization. Flow diagrams are constructed using Business Process Model and Notation (BPMN) [9], a widely used system that visually represents sequences in the process flow, ensuring clarity in understanding the stages and tasks involved.

### V. RESULTS

The process of calculating the energy balance is a complex concept that combines closely interrelated subsets of methods, tools, and data (Fig. 1). The specificity of the data subset influences the formation of the methods subset that will be used to calculate the energy balance. The methods in turn determine the tools for calculating the energy balance. The tools influence the formation of an initial data subset, which will subsequently be used by them through the prism of methods.

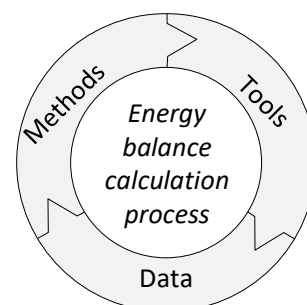


Figure 1. Subsets of energy balance calculation process

In general, the data required to analyze the energy balance of buildings can be divided into several groups (Fig. 2) [10].

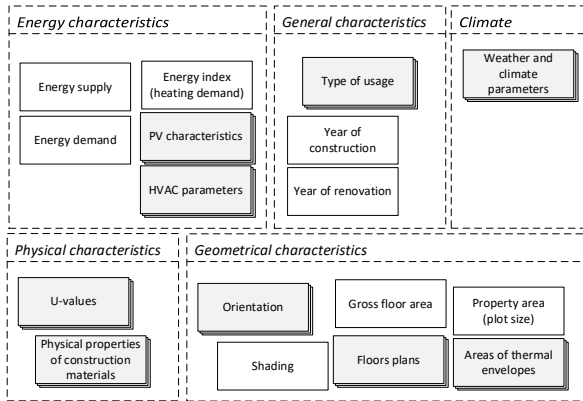


Figure 2. Initial dataset for buildings energy balance calculation

The data set “general characteristics” consists of data, that helps classify initial datasets and make adequate assumptions e.g. on base of construction years etc. if they are required. The “Energy characteristics” dataset describes parameters of heat, ventilation, and air conditioning systems, and PV systems if they are used. The “Geometrical” dataset includes dimensions of the analyzed district, building orientations, and shading, which in some ways correlate with energy consumption and demand. “Physical” parameters mostly describe buildings' construction materials and are closely related to their energy losses. The "Climate" dataset contains all required data about weather and insulation in the region, which is especially necessary for transient energy balance analysis. All these subsets of data form the so-called “initial” dataset for energy balance calculation.

From the roles point of view, the initial dataset (see Fig. 2) is forming as shown in Fig. 3 and includes two key players: district representatives and experts.

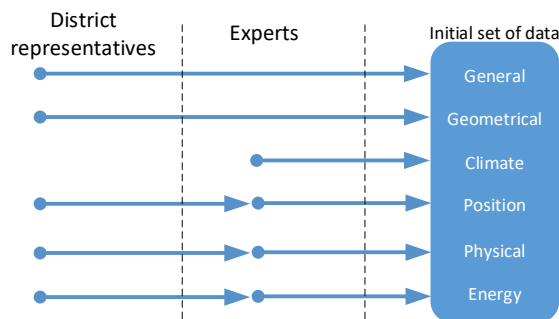


Figure 3. Roles in initial dataset forming

The process of the initial dataset forming always involves district representatives and experts. Some subsets could be directly formed by experts (e.g. climate

and weather data), while others start on the district representatives' level and go through experts where additional interpretations are made. It should be noted that for highly digitalized regions involvement of the district representatives is small and increasing with the digitalization level decreasing.

In general, the whole process of building energy balance calculation could be divided into three main stages:

- Focus district characterization.
- Dataset forming.
- Energy balance assessment.

In the first stage "district characterization" the boundaries of the district are defined. It means that energy flows, geographic boundaries, district development goals, key performance indicators, etc. should be defined [11]. This process is quite well described in [12]. It should be noted, that the focus district characterization weakly depends on computer technologies and the whole digitalization level as it requires mostly analytical work from experts with stakeholders' support.

The second stage “Dataset forming” is the least formalized and practically not described in the open literature. However, it is the quality of preparation of the initial data set that will directly affect the quality of the results obtained in the third stage (e.g. [13]).

Thus, there is a need to formalize the process of preparing initial data for calculating the energy balance, and, as a result, improve the quality and efficiency of the calculation process.

Using the above-described methods and initial dataset there was identified algorithm (process flow) of the dataset formed for buildings energy balance calculation, for regions with high levels of digitalization process flow is shown in Fig. 4.

The process of dataset forming starts after focus district characterization and requires a description of district boundaries [12]. This information is analyzed and requires information to be taken from outer databases (climate/weather (e.g. [14]), energy monitoring/statistical (e.g. [15]), building documentation databases (e.g. [16]) and GIS systems (e.g. [17])). District representatives are involved remotely only if required data cannot be approached directly by experts. In case data cannot be obtained assumptions are made. Before forming the final dataset, all collected information is interpreted to the required format to be transferred to the next task of energy balance calculation.

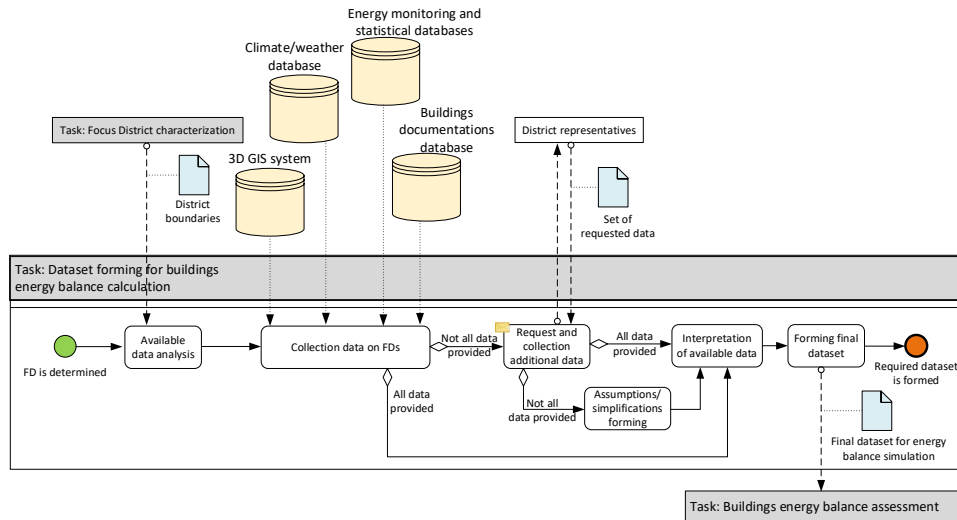


Figure 4. Roles in initial dataset forming

## VI. CONCLUSIONS

In conclusion, this paper presents a comprehensive framework for the development of initial datasets required for building energy balance simulations, which could be adapted to different levels of district digitalization. The structured process flow and role identification provide a formalized approach that bridges the often-overlooked gap in the dataset preparation phase. The framework ensures adaptability to various district contexts, improving the accuracy and efficiency of energy balance simulations. The collaboration between district representatives and experts is a critical element, with the involvement of district representatives increasing as digitalization levels decrease. This study highlights the importance of well-prepared datasets in optimizing energy balance calculations, which are essential for the planning and implementation of positive energy districts. The formalization of this process enhances clarity and contributes significantly to the growing body of research focused on energy efficiency and sustainability in urban environments. The proposed framework offers a reliable foundation for future research and practical applications in urban energy management.

## REFERENCES

- [1] A. J. Marszal, P. Heiselberg, J. S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano, “Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies”, *Energ. Buildings*, 43, 2011, pp. 971–979. doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022.
- [2] L. Vandenbogaerde, S. Verbeke, A. Audenaert, “Optimizing building energy consumption in office buildings: A review of building automation and control systems and factors influencing energy savings”, *Journal of Building Engineering*, 76, 2023, 107233. doi.org/10.1016/j.job.2023.107233.
- [3] V. Vaidhyanathan, “Synthetic 3D Building Energy Model (BEM) Dataset Generation for Human+ AI Synergies in Early-Phase High Performance Building Design”, Doctoral dissertation, Carnegie Mellon University, 2021.
- [4] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, C. O. Pedersen, F. C. Winkelmann, “Energy plus: energy simulation program”, *ASHRAE journal*, 42(4), 2000, pp. 49–56.
- [5] A. Oraopoulos, B. Howard, “On the accuracy of urban building energy modelling”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 2022.
- [6] A. Vartholomaïos, A. Chatzidimitriou, K. Ioannidis, “Estimating the influence of building and urban form on the thermal loads of urban dwellings in the Mediterranean climate using machine learning”, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 16(8), 2021, pp. 687–706.
- [7] M. Labiadh, “Methodology for construction of adaptive models for the simulation of energy consumption in buildings”, *Modeling and Simulation*. Université de Lyon, 2021.
- [8] H. Zhao, “Artificial intelligence models for large scale buildings energy consumption analysis”, *Ecole Centrale Paris*, 2011.
- [9] R. Dijkman, J. Hofstetter, J. Koehler, “Business Process Model and Notation”, Vol. 89, 2011. Berlin, Germany: Springer.
- [10] P. Tuominen, R. Holopainen, L. Eskola, J. Jokisalo, M. Airaksinen, “Calculation method and tool for assessing energy consumption in the building stock”, *Build. Environ.*, 75, 2014, pp. 153–160. doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.02.001.
- [11] X. Zhang, S. R. Penaka, S. Giriraj, M. N. Sánchez, P. Civiero, H. Vandevyvere, “Characterizing Positive Energy District (PED) through a Preliminary Review of 60 Existing Projects in Europe”, *Buildings*, 11 (8), 2021. doi.org/10.3390/buildings11080318.
- [12] S. Schneider, T. Zelger, D. Sengl, J. Baptista, “A Quantitative Positive Energy District Definition with Contextual Targets”, *Buildings*, 13, 2023. doi.org/10.3390/buildings13051210.
- [13] W. Tian “A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 20, 2013, pp. 411–419. doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014.
- [14] A. Amin, M. Mourshed “Weather and climate data for energy applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 2024. doi.org/10.1016/j.rser.2023.114247.
- [15] Z. Tian, X. Zhang, S. Wei, S. Du, X. Shi, “A review of data-driven building performance analysis and design on big on-site building performance data”, *Journal of Building Engineering*, 41, 2021. doi.org/10.1016/j.job.2021.102706.
- [16] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, “TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable”, *Energ. Buildings*, 132, 2016, pp. 4–12. doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.094.
- [17] X. Liu, X. Wang, G. Wright, J. Cheng, X. Li, R. Liu, “A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS)”, *ISPRS Int. Geo-Inf.*, 6, 2017. doi.org/10.3390/ijgi6020053.

# Point Optimal Control of Pseudoparabolic Systems with Memory

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.066>

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 use the method of a priori inequalities in negative norms to prove the well-posedness of the Dirichlet initial boundary value problem for the differential and integro-differential equations of the pseudo-parabolic type with integral terms of the Volterra type. Further we provide theorem on optimal control existence. The result is obtained under less assumptions on the equation's coefficients than in similar papers.

**Keywords:** Dirichlet problem, integro-differential equation, Volterra operator, a priori estimates, generalized solutions

## I. INTRODUCTION

Pseudoparabolic differential and integro-differential models are among the many objects studied in applied mathematics. Models of this type describe a wide class of physical processes, including: radiation with time delay, two-phase models of porous media flow with dynamic capillarity or hysteresis, ion migration in soil, heat conduction in heterogeneous media, etc. (see, for example, [1],[2] and the references therein).

In [1],[3] S.I. Lyashko and his colleagues developed a method of a priori inequalities in negative norms, by which a wide range of optimization problems for various systems with distributed parameters, including differential models of the pseudoparabolic type, were studied (look also [4] and the references there).

Subsequently, it turned out that this approach could also be effectively applied to Dirichlet problems for integro-differential equations with Volterra-type integral components [2], [5], [6].

In our work, we prove a priori inequalities similar to those in [1] and [2] for the linear pseudoparabolic differential equation

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_1 u \equiv & - \sum_{i,j=1}^n (a_{ij}(x) u_{x_j})_{x_i t} + a(x) u_t - \\ & - \sum_{i,j=1}^n (b_{ij}(x) u_{x_j})_{x_i} + b(x) u = f(x, t), \end{aligned} \quad (1)$$

and the linear integro-differential equation with a Volterra-type integral operator

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_2 u \equiv & \mathcal{L}_1 u + \\ & + \int_0^t \sum_{i=1}^n (K_i(x, t, \tau) u_{x_i}(x, \tau))_{x_i} d\tau = f(x, t), \end{aligned} \quad (2)$$

with initial-boundary Dirichlet conditions

$$u|_{t=0} = 0, \quad u|_{x \in \partial \Omega} = 0. \quad (3)$$

At the same time, we do not require the conditions of non-negative definiteness of the coefficient matrix  $\{b_{ij}\}_{i,j=1}^n$  and the non-negativity of the function  $b$ , which are required in [1] and [2]. Thus, the results concerning the well-posedness of the initial-boundary problems and the existence of optimal control will be justified under weaker requirements for the equation coefficients.

## II. MAIN NOTATION

Let the system's evolution be described by the linear equation  $\mathcal{L}u = f$ , where  $\mathcal{L}$  can denote either the differential operator (1) or the integro-differential operator (2). The function  $u(x, t)$  describes the state of the system in the domain  $Q = \Omega \times (0, T)$ , where  $\Omega \subset \mathbb{R}^n$  is a bounded spatial domain with a smooth boundary  $\partial \Omega$ . The function  $u$  satisfies the homogeneous initial-boundary Dirichlet conditions (3).

We assume that  $\{a_{ij}\}_{i,j=1}^n, \{b_{ij}\}_{i,j=1}^n \subset C^1(\overline{\Omega})$ ,  $a, b \in C(\overline{\Omega})$ , the kernels  $K_i(x, t, \tau)$  are continuously differentiable, and for all  $x \in \Omega$  the following relations hold

$$a_{ij}(x) = a_{ji}(x), \quad b_{ij}(x) = b_{ji}(x), \quad a(x) \geq 0,$$

and there exists a positive constant  $\alpha$  such that the functions  $a_{ij}(x)$  satisfy the condition

$$\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \xi_i \xi_j \geq \alpha \sum_{i=1}^n \xi_i^2,$$

for any  $x \in \Omega$  and  $\xi_i \in \mathbb{R}$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Notably, unlike in [1],[2], we do not require other conditions on the coefficients  $b_{ij}$ ,  $b$ .

We consider the set  $C_{BR}^\infty$  of infinitely differentiable functions in the domain  $\overline{Q}$  that satisfy the homogeneous initial and boundary conditions (3), and the set  $C_{BR^+}^\infty$  of infinitely differentiable functions  $v(x, t)$  that satisfy the conditions

$$v|_{t=T} = 0, \quad v|_{x \in \partial \Omega} = 0. \quad (4)$$



The domains of definition of the operators  $\mathcal{L}$  and  $\mathcal{L}^*$  will be considered as the spaces  $C_{BR}^{\infty}$  and  $C_{BR^+}^{\infty}$ , respectively.

By  $W_{BR}, H_{BR}$  we denote the completion of the space of smooth functions  $C_{BR}^{\infty}$  that satisfy the conditions (3) with respect to the norms

$$\|u\|_{W_{BR}} = \left( \int_Q u_t^2 + \sum_{i=1}^n u_{x_i t}^2 dQ \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

$$\|u\|_{H_{BR}} = \left( \int_Q u^2 + \sum_{i=1}^n u_{x_i}^2 dQ \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Similarly, let  $W_{BR^+}, H_{BR^+}$  be the completion of the space of smooth functions  $C_{BR^+}^{\infty}$  with respect to the norms (5), (6). Finally, by  $W_{BR}^-, H_{BR}^-, W_{BR^+}^-, H_{BR^+}^-$  we denote the negative spaces constructed from the corresponding positive spaces with respect to  $L_2(Q)$ .

### III. MAIN RESULTS

The following theorem holds:

**Theorem 1.** *There exist constants  $C_1 > 0, C_2 > 0$  such that for any  $u \in W_{BR}$  and  $v \in W_{BR^+}$  the inequalities hold:*

$$\begin{cases} C_1 \|u\|_{H_{BR}} \leq \|Lu\|_{W_{BR^+}^-} \leq C_2 \|u\|_{W_{BR}}, \\ C_1 \|v\|_{H_{BR^+}} \leq \|L^*v\|_{W_{BR}^-} \leq C_2 \|v\|_{W_{BR^+}}. \end{cases} \quad (7)$$

We use the following definition of a solution of the equation  $Lu = f$

**Definition.** *A function  $u \in H_{BR}$  is called a generalized (weak) solution of the equation  $Lu = f, f \in W_{BR^+}^-$  if*

$$\langle u, L^*v \rangle_{H_{BR}} = \langle f, v \rangle_{W_{BR^+}},$$

for any functions  $v \in W_{BR^+}$  such that  $L^*v \in H_{BR}^-$ .

Based on the inequalities (7) and the results of the works [1],[2], we formulate the theorem on the problem well-posedness:

**Theorem 2.** *For any  $f \in W_{BR^+}^-$  there exists a unique solution  $u \in H_{BR}$  of the equation  $Lu = f$  in the sense of definition above, and there exists a constant  $C > 0$  such that  $\|u\|_{H_{BR}} \leq C \|f\|_{W_{BR^+}^-}$ .*

**Remark.** *Similar definition and theorem could be formulated for the adjoint problem.*

Let us consider the problem of optimal control of a system, the evolution of which is described by the linear equation

$$Lu = f + Ah, f \in W_{BR^+}^-. \quad (8)$$

Here  $u(x, t) \in H_{BR}$  is a function that depends on the control  $h$ , defined in the admissible set  $\mathcal{U}$  of the control space  $\mathcal{H} = ([a, b] \times L_2((0, T) \times \Omega'))^s$ , and

$$Ah = \sum_{i=1}^s \delta(x_1 - x_{1,i}) \otimes \varphi_i(t, x_2, \dots, x_n). \quad (9)$$

Here

$$x_1, x_{1,i} \in [a, b], \varphi_i(t, x_2, \dots, x_n) \in L_2((0, T) \times \Omega').$$

On the solutions of the equation (8) a certain functional  $J(h) = \Phi(u(h))$  is defined, which needs to be minimized under the condition  $h \in \mathcal{U}$ .

The following theorem on the existence of optimal control holds

**Theorem 3.** *If the quality criterion  $\Phi: H_{BR} \rightarrow \mathbb{R}$  is weakly lower semi-continuous with respect to the system state  $u(x, t, h)$  and is bounded from below, and if the set of admissible controls  $\mathcal{U}$  is closed, bounded, and convex in  $\mathcal{H}$ , then the optimal control of the system (8) with the control operator (9) exists.*

### 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.V. "Generalized optimal control for systems described by linear integro-differential equations with nonnegative definite integral operators", Journal of Automation and Information Sciences, 2014, Vol.46, № 6, pp. 58-67.
- [6] Anikushyn A., Hulianytskyi A. "Generalized solvability of parabolic integro-differential equations", Differential Equations, 2014, Vol.50, № 1, pp. 98-10

# Mathematical modeling of the body's immune response to infectious disease with external factors

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.067>

Yaroslav Bihun  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
Chernivtsi, Ukraine  
y.bihun@chnu.edu.ua

Oleh Ukrainets  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
Chernivtsi, Ukraine  
o.ukrainets@chnu.edu.ua

The article investigates a mathematical model of the immune response to an infectious disease, considering external factors that influence the course of the disease. Stationary solutions and their existing conditions have been identified, along with their medical interpretation and sufficient conditions for asymptotic stability.

**Keywords** — *mathematical model of infectious disease, модель імунна відповідь, стаціонарний розв'язок, стійкість, антигени, антитіла, плазмоклітини, запізнення.*

Mathematical immunology aims to utilize mathematical methods and information technologies to model immune processes, enabling their study and prediction. The adequacy of the mathematical model of the immune response significantly depends on the mathematical formulation, particularly on the selection of factors that influence the immune response in an infectious disease.

This field of applied mathematics has been actively developing since the works of G. Bell. A foundational model is G.I. Marchuk's mathematical model of the immune response to an infectious disease, proposed in 1975 [1]. Several significant results have been obtained in the works of U. Forish and M. Bodnar [2], V.P. Martsenyuk and O.H. Nakonechnyi [3], A.Ya. Bomba [4], S. Rusakov [5], among others.

In this study, the research presented in [6] has been continued, focusing on the impact of external factors on the immune response to an infectious disease, which is modeled as a solution to the generalized Hutchinson model

$$\frac{dE(t)}{dt} = r \left( 1 - \left( \frac{E(t - \Delta)}{E^*} \right)^n \right) E(t), t > 0, \quad (1)$$

where  $E(t)$  is the integrated dimensionless factor of external influence, such as environmental pollution,  $0 \leq E(t) \leq 1$ ,  $r > 0$  is the linear growth coefficient,  $0 < \Delta$  is the average time for ecological equilibrium restoration,  $n > 1$  and provides flexibility in describing the dynamics of the process.

If the condition

$$0 < r\Delta < \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

is satisfied, it has been proven that the stationary solution  $E = E^*$  is locally asymptotically stable.

A generalization of G.I. Marchuk's model includes considering the influence of the factor  $E(t)$  on the formation of the plasma cell cascade  $C(t)$  and the extent of damage to the target organ  $m(t)$ ,  $0 \leq m(t) \leq 1$ . The mathematical model takes the form:

$$\frac{dV}{dt} = (\beta - \gamma F)V,$$

$$\frac{dC}{dt} = \alpha \xi(m) V_{\tau} F_{\tau} - \mu_c (C - C^*) - \varepsilon_c E, \quad (3)$$

$$\frac{dF}{dt} = \rho C - (\mu_f + \eta \gamma V)F,$$

$$\frac{dm}{dt} = \sigma V - \mu_m m + \varepsilon_m E,$$

where  $V(t)$  is the population of antigens (viruses, bacteria, etc.),  $F(t)$  is the population of antibodies,  $0 < \tau$  is the time required for the formation of the plasma cell cascade,  $V_{\tau}(t) = V(t - \tau)$ ,  $F_{\tau}(t) = F(t - \tau)$ ,  $\xi(m) = 1$  when  $0 \leq m \leq m^*$ , while  $\xi(m) = 1 + (m - 1)/(m^* - 1)$  for  $m > m^*$ , where the stationary solution does not exist due to immune system dysfunction.

**Theorem 1.** If the coefficients of the mathematical model (1), (3) are non-negative numbers, and the initial functions for the factors  $E, F$  i  $V$  are non-negative functions on the initial intervals  $[-\Delta; 0]$  i  $[-\tau; 0]$  respectively, then there exists a unique continuous solution for  $t > 0$ . ■

In the system (1)-(3) exists a stationary solution:

$$E_1 = E^*, V_1 = 0,$$

$$C_1 = C^* - \frac{\varepsilon_c E^*}{\mu_c}, F_1 = \frac{\rho C_1}{\mu_f}, m_1 = \frac{\varepsilon_m E^*}{\mu_m}, \quad (4)$$

when

$$C^* \mu_c > \varepsilon_c E^*, \varepsilon_m E^* \leq \mu_m m^*. \quad (5)$$

This solution corresponds to the state of a healthy human organism.

**Theorem 2.** Let the conditions (2) and (5) hold, and  $\beta - \gamma F_1 < 0$ , (6) then the stationary solution (4) is locally asymptotically stable. ■

**Corollary.** If the conditions of Theorem 1 are satisfied and  $V_0 = V^*$ , then the disease will not occur. In this case, the stability depends on the delay  $\Delta$  and is independent of the delay  $\tau > 0$ .

The system of equations (1), (3) may have another stationary solution, which corresponds to the state of a chronic disease:

$$\begin{aligned}
 E_2 &= E^*, F_2 = \frac{\beta}{\gamma}, m_2 = \frac{\delta V_2 + E_2}{\mu_m}, \\
 V_2 &= \frac{\mu_c \mu_f \beta - \rho \gamma \mu_c C^* + \rho \gamma \varepsilon_c E^*}{\beta(\alpha \rho - \mu_c \eta \gamma)}, \\
 C_2 &= \frac{\alpha \beta \mu_f - \eta \gamma^2 \mu_c C^* + \eta \gamma^2 \varepsilon_c E^*}{\gamma(\alpha \rho - \mu_c \eta \gamma)}.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

The stationary solution (7) exists if either

$$\alpha \rho > \mu_c \eta \gamma, \quad \rho \gamma \mu_c C^* < \mu_c \mu_f \beta + \rho \gamma \varepsilon_c E^*$$

or the inequality with the opposite sign is satisfied.

Using the Wolfram Mathematica computer algebra system, numerical immune response modeling, accounting for external influence, was conducted. Figure 1 shows the variation in the magnitude of external influence depending on certain parameter  $n = 1, 2$  and 3.

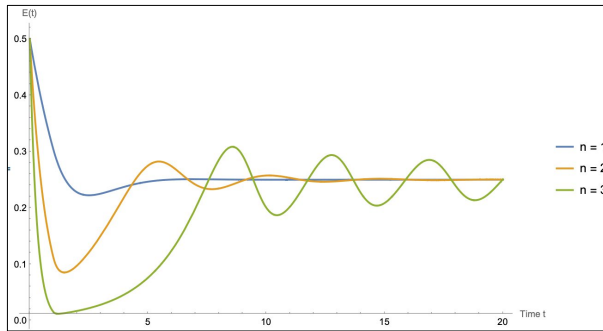


Figure 1. The dynamics of the generalized Hutchinson model for  $n = \{1, 2, 3\}$  and  $r = 0.5, \Delta = 1, E^* = 0.25$ .

In Figure 2, the functions' graphs are presented in the absence of external influence. When external influence is present (Figure 3), a weaker immune response is observed, along with oscillations in the number of plasma cells and damage to the target organ.

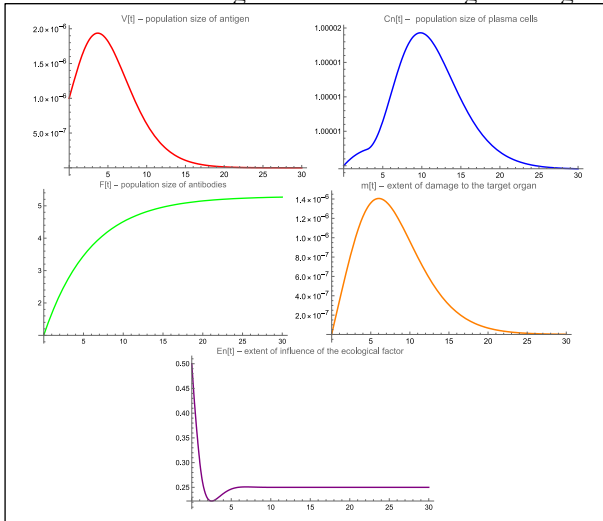


Figure 2. Dynamics in the immune response model without external influence. Parameters:  $\beta = 0.6, \gamma = 0.2, \alpha = 0.9, \mu_c = 0.5, C^* = 1, \varepsilon_c = \varepsilon_m = 0, \rho = 0.9, \mu_f = 0.17, \eta = 0.8, \sigma = 0.35, \mu_m = 0.4, r = 0.5, \Delta = 1, E^* = 0.25, n = 1; V_0 = 0.000001, C_0 = F_0 = 1, E_0 = 0.5, m_0 = 0$

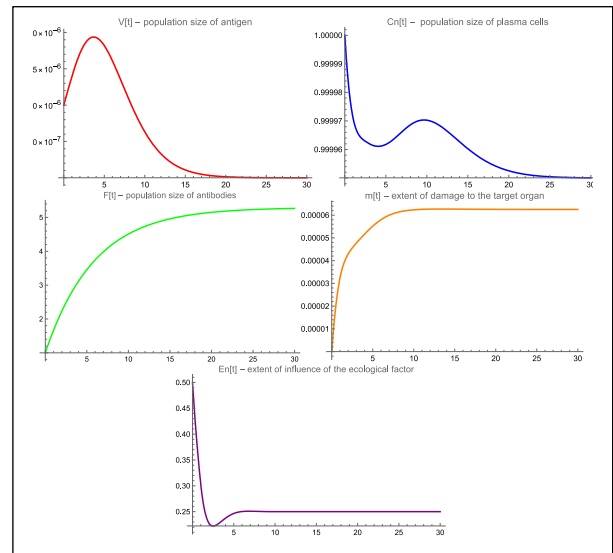


Figure 3. Dynamics in the immune response model with external influence. Parameters:  $\beta = 0.6, \gamma = 0.2, \alpha = 0.9, \mu_c = 0.5, C^* = 1, \varepsilon_c = 0.0001, \rho = 0.9, \mu_f = 0.17, \eta = 0.8, \sigma = 0.35, \mu_m = 0.4, \varepsilon_m = 0.0001, r = 0.5, \Delta = 1, E^* = 0.25, n = 1; V_0 = 0.000001, C_0 = F_0 = 1, E_0 = 0.5, m_0 = 0$

### REFERENCES

- [1] Marchuk G.I. Mathematical Modelling of Immune Response in Infectious Diseases. Springer Science+Business Media, 1997. 350 p.
- [2] Bodnar, M., Forys, U. A Model of Immune System with Time-Dependent Immune Reactivity. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, 2009, 70(2). Pp. 1049-1058.
- [3] Marzeniuk V., Nakonechny A. Investigation of delay system with piecewise right side arising in radiotherapy. WSEAS Transactions on Mathematics. 2004. Vol. 3(1). Pp. 181–187.
- [4] Baranovsky S., Bomba A., Lyashko S., Pryshepa, O. Diffusion Perturbations in Models of the Dynamics of Infectious Diseases Taking into Account the Concentrated Effects. Computational Methods and Mathematical Modeling in Cyberphysics and Engineering Applications 1, 2024. Pp. 273–303.
- [5] Rusakov S., Chirkov M., & Volinsky I. Modeling of Stable Immune Response Management. Functional Differential Equations, Volume 28, No. 3-4, 2021. Pp. 149-157.
- [6] Bihun Y., Ukrainets O. Mathematical Modelling of Immune Response to Infectious Diseases with Ecological Factor. Proceedings Int. conf. dedicated to the 60th anniversary of the foundation of V. Andrunachievici. Institute of Mathematics and Computer Science. Chisinau, 2024. Pp. 151-154.

# Perturbation Theory Methods for the Semiconductor Plasma Diode Simulation

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.068>

Andrii Bomba  
 Department of Computer Science  
 and Applied Mathematics  
 National University of Water and  
 Environmental Engineering  
 Rivne, Ukraine  
 abomba@ukr.net  
 orcid.org/0000-0001-5528-4192

Igor Moroz  
 Department of Information  
 Technologies and Modeling  
 Rivne State University of  
 Humanities  
 Rivne, Ukraine,  
 igor\_moroz@yahoo.com  
 orcid.org/0000-0001-6381-2266

**Abstract** — *A technique for solving a nonlinear singularly perturbed boundary value problem of predicting the state of an electron-hole plasma in the active region of p-i-n (plasma) diodes is considered. The problem is formulated for system of equations of the electron and hole currents continuity and the Poisson's equation. The solution to the problem is sought by the asymptotic method of boundary corrections. It is shown that boundary corrections play a key role in forming the electric field in the active region of the diode. Under certain conditions, boundary corrections demonstrate non-monotonic behavior. The presence of boundary corrections makes it possible to solve problems of heat distribution in the semiconductor device under study, problems of the influence of external electromagnetic fields on electron-hole plasma, etc. A series of computer experiments were conducted.*

**Keywords**— *perturbation method, singularly perturbed boundary value problem, asymptotic series, boundary function, p-i-n-diode.*

## I. INTRODUCTION

One of the common methods for modeling the physical properties of semiconductor devices is to solve a system of equations for the continuity of diffusion-drift, recombination of the charge carriers currents and the Poisson's equation with corresponding boundary and initial conditions to obtain information about the distribution of charge carriers ( $n(\vec{r}, t)$ ,  $p(\vec{r}, t)$ ,  $\vec{r}$  is the spatial coordinates vector,  $t$  – time) and potential ( $\varphi(x, t)$ ) in a certain active region of the device [1,2]. This systems of equations have a number of common properties, in particular: 1) they are nonlinear; 2) in normalized form the corresponding problems are singularly perturbed. These circumstances prompt the decision to involve the boundary function method [3-6] of perturbation theory [7,8] as instrumental tools.

The **purpose** of the paper to demonstrate the effectiveness of using the method of boundary functions of perturbation theory in a systematic approach to solving problems of semiconductor electronics using the example of a plasma diode.

## II. BASIS MATHEMATICAL MODEL OF THE STUDIED SYSTEM.

The operation of a semiconductor p-i-n-diode is based on the ability to control the conductivity of an electron-hole plasma formed in the active region (i-region) of such a device. The general formulation of the problem of modeling physical processes in the active region of the p-i-n-diode is as follows [1]:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{e}\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_p - R_p + G_p &= 0, \quad \frac{1}{e}\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_n - R_n + G_n = 0, \\ \vec{j}_p &= -e\mu_p p \vec{\nabla} \varphi - eD_p \vec{\nabla} p, \quad \vec{j}_n = -e\mu_n n \vec{\nabla} \varphi + eD_n \vec{\nabla} n, \\ \operatorname{div}(\vec{\nabla} \varphi) &= -e(p - n + N_d), \end{aligned} \quad (1)$$

where  $\vec{j}_p$ ,  $\vec{j}_n$  are the holes and electrons current densities consisting of drift and diffuse components;  $N_d$  is a given function of the doping profile of the semiconductor material with impurities (donors or acceptors);  $e$  is the electron charge;  $D_p$ ,  $D_n$  are the holes and electrons diffusion coefficients;  $\mu_p$ ,  $\mu_n$  are the charge carrier mobilities;  $R_p$ ,  $R_n$ ,  $G_p$ ,  $G_n$  are the recombination and generation rates of charge carriers respectively. The system of equations (1) is supplemented by the corresponding boundary and initial conditions.

In simplified case the mathematical model of electron-hole plasma description in the active region of a p-i-n-diode (only by one spatial coordinate - the case is typical for bulk diodes,  $V = \{(x) : 0 < x < w\}$ ) has the following form:

$$\begin{cases} \mu^2 \frac{\partial E}{\partial x} = -(p-n), \\ B_n \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial n}{\partial x} E + n \frac{\partial E}{\partial x} - A_n n, \\ B_p \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{\partial p}{\partial x} E - p \frac{\partial E}{\partial x} - A_p p. \end{cases} \quad (2)$$

Independent variables  $x$ ,  $t$  and unknown functions  $E(x,t) = -\frac{d}{dx}\varphi(x,t)$ ,  $n(x,t)$ ,  $p(x,t)$  in the system of equations

(2) are presented in normalized form –  $\tilde{x} = \frac{x}{w}$  ( $\tilde{x} \in [0,1]$ ),  $\tilde{t} = \frac{t}{T}$

( $\tilde{t} \in [-\infty, \infty]$ ), periodic process:  $T$  is the period of the process),

$\tilde{\varphi}(\tilde{x}, \tilde{t}) = \frac{e\varphi(x,t)}{kQ_0}$ ,  $\tilde{n}(\tilde{x}, \tilde{t}) = \frac{n(x,t)}{N_i}$ ,  $\tilde{p}(\tilde{x}, \tilde{t}) = \frac{p(x,t)}{N_i}$  (the sign “ $\sim$ ”

is omitted from now on). Also in (1) the following notation is used:  $\mu^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\kappa Q_0}{e^2 w N_i}$  (small parameter  $\mu^2 \sim 10^{-4} \div 10^{-6}$ );  $Q_0$  –

temperature (300° K);  $\kappa$  – Boltzmann constant;  $\varepsilon$  – relative dielectric constant;  $\varepsilon_0$  – electrical constant;  $w$  is the characteristic size of the active region of the diode;  $N_i$  – constant, which determines the concentration of charge carriers in the intrinsic semiconductor, depends on the selected semiconductor material;  $A_n = w^2/D_n\tau_n^*$ ;  $A_p = w^2/D_p\tau_p^*$ ;  $D_n$ ,  $D_p$  are the diffusion coefficients of electrons and holes, respectively;  $\tau_n^*$ ,  $\tau_p^*$  – characteristic times of recombination of electrons and holes;  $B_n = w^2/D_n T$ ;  $B_p = w^2/D_p T$ .

At the boundaries  $x=0$  and  $x=l$  under the action of the applied current and potential difference, charge carriers are injected into the active region. The injected flow has a diffusion character and its formation is influenced by the processes of surface recombination of electrons and holes. Used are boundary conditions of the form [1]:

$$\left. \frac{\partial n}{\partial x} - \gamma_n w n \right|_{x=0} = \frac{J(t) w}{e D_n N_i}, \quad \left. -\frac{\partial p}{\partial x} - \gamma_p w p \right|_{x=0} = 0, \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma_p w p \right|_{x=l} = -\frac{J(t) w}{e D_p N_i}, \quad \left. \frac{\partial n}{\partial x} - \gamma_n w n \right|_{x=l} = 0,$$

$$E|_{x=0} = 0, \quad E|_{x=l} = 0, \quad \int_0^l E(x,t) dx = U(t),$$

where  $J(t)$ ,  $U(t)$  are specially specified periodic functions that determine the current density and voltage of the control signal, respectively,  $\gamma_n$ ,  $\gamma_p$  – recombination coefficients of charge carriers at the contacts.

Note that the given problem is a non-linear non-stationary singularly perturbed boundary value problem of mathematical physics without initial conditions.

### III. ASYMPTOTICS OF THE PROBLEM SOLUTION

To solve the problem, we successively use the method of boundary corrections of perturbation theory [3-8] and the Fourier method of separating variables. Guided by the

methodology developed in the works [3,9], we propose to look for a solution in the following form:

$$\begin{aligned} n(x,t) &= N(x,t) + \underline{N}(\underline{\xi}, t) + \overline{N}(\overline{\xi}, t), \\ p(x,t) &= P(x,t) + \underline{P}(\underline{\xi}, t) + \overline{P}(\overline{\xi}, t), \\ E(x,t) &= \tilde{E}(x,t) + \underline{E}(\underline{\xi}, t) + \overline{E}(\overline{\xi}, t), \end{aligned} \quad (4)$$

where  $N(x,t)$ ,  $P(x,t)$ ,  $\tilde{E}(x,t)$  are the regular components of the solution, which are presented in the form of asymptotic series in powers of the small parameter;  $\underline{N}(\underline{\xi}, t)$ ,  $\underline{P}(\underline{\xi}, t)$ ,

$\underline{E}(\underline{\xi}, t)$ ,  $\overline{N}(\overline{\xi}, t)$ ,  $\overline{P}(\overline{\xi}, t)$ ,  $\overline{E}(\overline{\xi}, t)$  – boundary corrections, respectively, in the vicinity of points  $x=0$  and  $x=l$  ( $\underline{\xi} = x/\mu$ ,  $\overline{\xi} = (l-x)/\mu$  – regularizing stretches), which are also given in the form of corresponding asymptotic series ( $R_{E(s)}(x,t,\mu)$ ,  $R_{n(s)}(x,t,\mu)$ ,  $R_{p(s)}(x,t,\mu)$  – residual terms):

$$\begin{pmatrix} n(x,t) \\ p(x,t) \\ E(x,t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^s \mu^i n_i \\ \sum_{i=0}^s \mu^i p_i \\ \sum_{i=0}^s \mu^i E_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^s \mu^i \underline{N}_i \\ \sum_{i=0}^s \mu^i \underline{P}_i \\ \sum_{i=1}^s \mu^i \underline{E}_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^s \mu^i \overline{N}_i \\ \sum_{i=0}^s \mu^i \overline{P}_i \\ \sum_{i=1}^s \mu^i \overline{E}_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{n(s)} \\ R_{p(s)} \\ R_{E(s)} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Similarly to [5, 10], by sequentially substituting (4) and (5) into the system of equations (2), boundary conditions (3) and grouping regular component equations, corresponding boundary corrections, and equating coefficients with the same powers of the small parameter, we obtain the following sequence of tasks (for leading terms of asymptotics):

$$\begin{cases} p_0(x,t) - n_0(x,t) = 0, \\ \frac{\partial^2 n_0(x,t)}{\partial x^2} - A_n n_0(x,t) - B_n \frac{\partial n_0(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (n_0(x,t) E_0(x,t)), \\ \frac{\partial^2 p_0(x,t)}{\partial x^2} - A_p p_0(x,t) - B_p \frac{\partial p_0(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (p_0(x,t) E_0(x,t)), \\ \left. \frac{\partial n_0(x,t)}{\partial x} - \gamma_n w n_0(x,t) \right|_{x=0} = \frac{J(t) w}{e D_n N_i}, \\ \left. -\frac{\partial p_0(x,t)}{\partial x} - \gamma_p w p_0(x,t) \right|_{x=l} = \frac{J(t) w}{e D_p N_i}, \\ -\left. \frac{\partial p_0(x,t)}{\partial x} - \gamma_p w p_0(x,t) \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial n_0(x,t)}{\partial x} - \gamma_n w n_0(x,t) \right|_{x=l} = 0; \end{cases} \quad (6.1)$$



$$\begin{cases} \frac{dE_{-1}(\underline{\xi}, t)}{d\underline{\xi}} = P_0(\underline{\xi}, t) - N_0(\underline{\xi}, t), \\ \frac{d^2 N_0(\underline{\xi}, t)}{d\underline{\xi}^2} = -\frac{d}{d\underline{\xi}} \left( (n_0(0, t) + N_0(\underline{\xi}, t)) E_{-1}(\underline{\xi}, t) \right), \\ \frac{d^2 P_0(\underline{\xi}, t)}{d\underline{\xi}^2} = \frac{d}{d\underline{\xi}} \left( (p_0(0, t) + P_0(\underline{\xi}, t)) E_{-1}(\underline{\xi}, t) \right), \\ \lim_{\underline{\xi} \rightarrow 0} E_{-1}(\underline{\xi}, t) = E^*(U(t)), \quad \left. \frac{dN_0(\underline{\xi}, t)}{d\underline{\xi}} \right|_{\underline{\xi}=0} = 0, \\ \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} N_0(\underline{\xi}, t) = 0, \quad \left. \frac{dP_0(\underline{\xi}, t)}{d\underline{\xi}} \right|_{\underline{\xi}=0} = 0, \quad \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} P_0(\underline{\xi}, t) = 0. \end{cases} \quad (6.2)$$

The formulation of the problem for determining the characteristics of the volume charge in the vicinity of the point  $x=l$  is similar to (6.2).

Note, that leading terms of the asymptotics (zero) make the main contribution to the problem solution Problems. Problem statements for the first and following members of the asymptotics have a similar form.

An important feature of this approach to modeling physical processes in a p-i-n diode is the ability to separate it into components that are convenient to interpret. For example, the system of equations (6.1) is easily reduced to the classical equation of ambipolar diffusion [1], which explains the formation of electron-hole plasma in the active region of a p-i-n diode and the appearance of an active component of impedance. Solutions to the system of equations (6.2) (first obtained in [9]) model the behavior of charge carriers in the zones of n-i, p-i contacts (space charge regions), which determine the reactive component of impedance, the distribution of electric field components in the system under study, and the mechanisms of thermal heating.

It was found that under certain conditions, the boundary functions demonstrate non-monotonic behavior (experimental fact), the theoretical description of which is not reflected in the literature. This issue remains to be studied in detail.

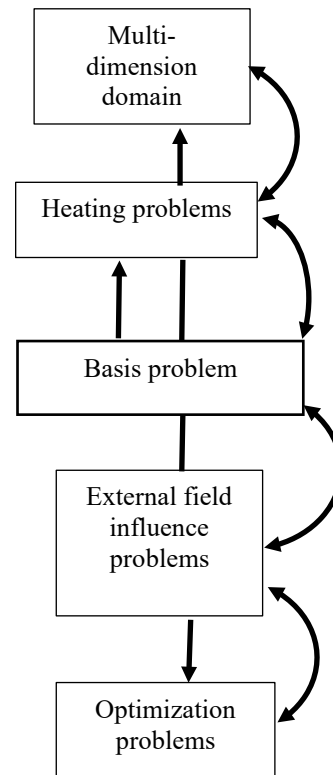
It should be noted that the algorithm for solving the problem using the asymptotic method is an example of the application of general system methods for studying complex systems – decomposition and synthesis. This is already evident at the level of solving the basic problem (1). When calculating, for example, temperature fields, the basic system of equations must be supplemented with the heat conductivity equation; when considering the processes of influence of external electromagnetic fields on the state of plasma – with the system of Maxwell equations. Separately, it is necessary to note the complication of the basic model in cases of solving the corresponding problems in areas of complex geometry or conducting optimization measures. Accordingly, the construction and use of a mathematical model of a p-i-n diode must be carried out using methods of system analysis.

IV. ANALYSIS OF RESULTS AND CONCLUSIONS

From the standpoint of the system approach, it is necessary, in particular, to determine the goals of modeling and, accordingly, select the components of the mathematical model that forms the network structure (Fig. 1), and assess the required level of adequacy of the results with the selected model layout.

Note that in each of the subproblems formed, it is possible to single out both singularly perturbed and regularly perturbed equations, which are solved using the corresponding asymptotic methods. In our opinion, in this case (solving problems of semiconductor electronics), the use of perturbation theory methods will be more effective than, for example, the use of computational methods. This conclusion is based on the fact that the sought functions in the boundary zones of the studied area have large gradients. As a result, the computational algorithm will be resource-intensive. In addition, some problems (similar to (6)) of the recurrent sequence of problems, which are obtained by perturbation theory methods, may have an exact analytical solution.

Несколько типичных модельных графиков распределений исследуемых характеристик в активной



области структур показано на рис. 2-6 (заимствованы с работ [10-12]). Результаты получены на основе анализа базовой модельной задачи.

The technique of solving the nonlinear singularly perturbed

Fig. 1.

boundary value problem of forecasting the state of electron-

hole plasma in the active region of p-i-n (plasma) diodes, which is based on the use of asymptotic methods (in particular, the

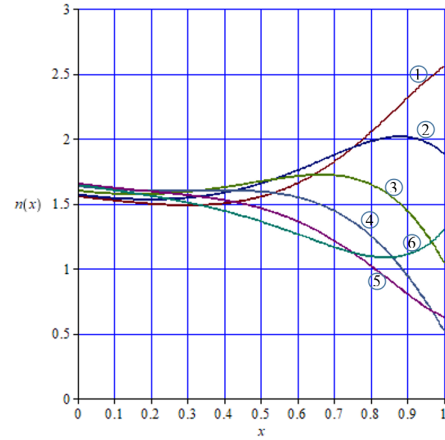
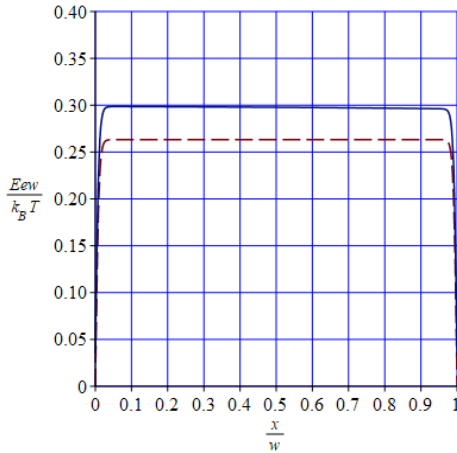


Fig. 2. Typical distribution of the electrostatic field strength in the active region of the p-i-n-diode (the total contribution of the main components of the regular component and boundary corrections is shown, stationary case)

boundary function method) has proven its effectiveness. If, with respect to the distribution of the concentration of charge carriers, the corrections are significant only in relatively narrow contact zones, then they play a key role in the formation of the electric field in the investigated region. The presence of boundary corrections to the electric potential distribution function provides the possibility of solving derivatives (to the basic) complete problems (for example, the problem of heat

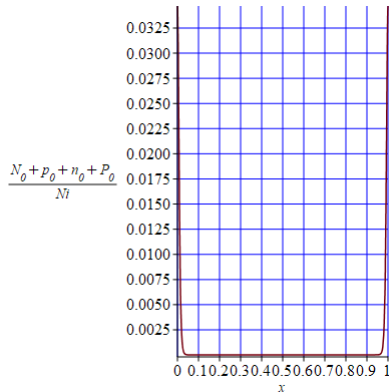


Fig. 3. Typical distribution of charge carrier concentration in the active region of the diode (the total contribution of the main components of the regular component and boundary corrections is shown, stationary case)

Fig. 4. Plasma concentration distributions in the diode active region in the development of the oscillatory process – regular parts of the asymptotics (1-0, 2-1/8T, 3-1/4T, 4-3/8T, 5-T/2, 6-5/8T)

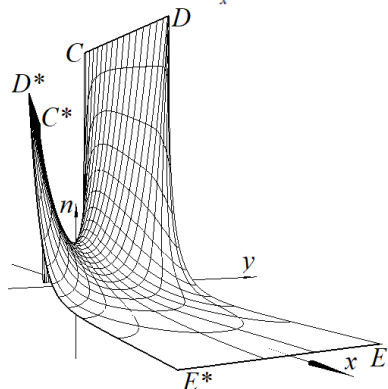
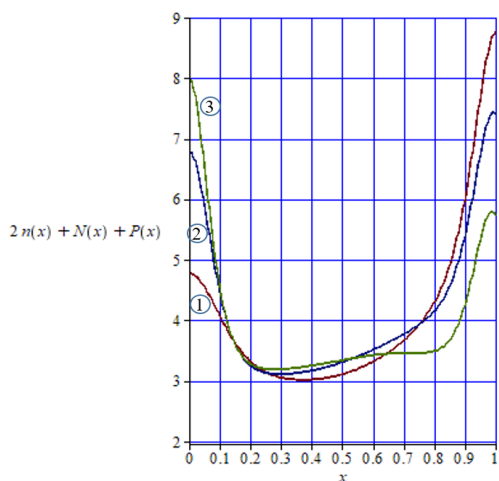


Fig. 6. Distribution of the concentration of charge carriers in the active region of the integrated p-i-n-structures (wedge-shaped contact region, stationary case)

distribution in the studied semiconductor device, the problem of the influence of external electromagnetic fields on electron-hole plasma, etc.). Boundary corrections play the role of connecting elements in the system of model problems.

REFERENCES

[1] S. Sze and K. Kwok, *Physics of Semiconductor Devices*, New York: Wiley-Interscience, pp. 815, 2006, doi: 10.1002/0470068329.

[2] M. J. Kumar, S. Hahmady, R. Gale and S. Bayne, "Charge Plasma High Voltage PIN Diode Investigation," 2018 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), Jackson, WY, USA, pp. 117-121, 2018, doi: 10.1109/IPMHVC.2018.8936701.

[3] A.B. Vasil'eva, V.F. Butusov and L.V. Kalachev, *The Boundary Function Method for Singular Perturbation Problems*. SIAM, Philadelphia, 1995, doi: 10.1137/1.9781611970784.

[4] M.P. Belyanin, "On the Asymptotic Solution of One P-N-junction Model," *U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys.*, vol. 26 (2), pp. 306-311, 1986, URL: <http://www.mathnet.ru/links/f91b663c991258d0733ea2d02cf7f68a/zvmmf9248.pdf>.

[5] A.B. Vasil'eva and V.G. Stel'makh, "Singularly perturbed systems in the theory of semiconductors," *U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys.*, vol. 17(2), pp. 339-348, 1977, URL: <http://www.mathnet.ru/links/5d86b56f4673e4843abf1810d61ba4e8/zvmmf6023.pdf>.

[6] Bambusi, D. *Perturbation Theory for PDEs*. In: Gaeta, G. (eds) "Perturbation Theory. Encyclopedia of Complexity and Systems Science Series", Springer, New York, NY, pp. 229-246, 2009, doi: 10.1007/978-1-0716-2621-4\_401.

[7] Huifang Liu, "Perturbation method for differential control equations and its application in the analysis of dynamic characteristics of curved beam," *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 59, Iss. 4, pp. 2583-2590, 2020, doi: 10.1016/j.aej.2020.04.022.

[8] D. R. Smith, *Singular-Perturbation Theory. An Introduction with Applications*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, pp. 520, 1985

[9] A.Ya. Bomba, I.P. Moroz, "Analysis of Nonlinear Processes in the P-I-N Diodes Plasma by the Perturbation Theory Methods", 2023 13<sup>th</sup> International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT-2023, Wroclaw, Poland, pp.117-120, 2023.

[10] A.Ya. Bomba, I.P. Moroz and M.V. Bojchura, "The Optimization of the Shape and Size of the Injection Contacts of the Integrated P-I-N-structures on the Base of Using the Conformal Mapping Method," *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 1, pp. 14-27, 2021.

[11] Bomba A., Moroz I., Boichura M. :Development and analysis of a mathematical model of plasma characteristics in the active region of integrated P-I-N-structures by the methods of perturbation theory and conformal mappings" *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №5 (113), pp. 51-61, 2021.

# The problem of aging as a problem of the appearance of unstable components when detailing the system

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.069>

Denys Cherhykalo  
 Faculty of Computer Science and Cybernetics  
 Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
 Kyiv, Ukraine

**Abstract** — Recently, interest in Physical Informed Neural Network (PINN) has grown. But the process of implementing these models in the field of mathematical biology is still in its infancy. For this area, the question of finding a region of stability is both very difficult and important. There are many models for disease, aging, and carcinogenesis, but they all rely on the concept of an attractor of human health and resilience. But if you teach Artificial Intelligence to maintain the region of stability of a healthy state, it will inevitably face entering the region of instability, in which there is great sensitivity to changes in parameters, which will give exponentially large gradients. But when it comes to critical processes, organisms have a fairly good set of ways to maintain short-term stability that they have acquired through the process of evolutionary selection. Thus, all factors that affect aging are dynamics with slow exponential growth throughout life, similar to DNA mutations. Therefore, a hypothetical rough model that could directly suppress all such deep problems in their infancy may be an interesting first approximation, although most likely, due to excessive suppression, it will simplify the structure of the organism itself and possibly make its tissues and coordination of cellular reprogramming more similar to the tissues of the immortal jellyfish *Turritopsis dohrnii*. This abstract approximation model has long-term stability, and from there we can view aging as a problem of unstable components emerging in the detailing of the organism that we must solve.

**Keywords** – PINN; mathematical biology; perturbation theory; life extension;

## I. INTRODUCTION

One of the most advanced models for simulating the structure of complex patterns of embryo development, organs and tissues is a multicomponent nonlinear partial differential equation.

The most famous of these is the reaction-diffusion equation, here is its usual form:

$$\frac{\partial u(t, X)}{\partial t} - (f(u(t, X)) + \Delta u(t, X)) = 0, X \in B,$$

$$X = (x, y),$$

$$\text{where } u(t, X) = (u_1(t, X), u_2(t, X), \dots, u_n(t, X)).$$

Or if we write down the components for each, then

$$\text{we have: } \frac{\partial u_i(t, X)}{\partial t} = (f_i(u_1(t, X), \dots, u_n(t, X)) + \Delta u_i(t, X))$$

$$i \in \overline{1, n}$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = b = 0, X \in \partial B$$

There were attempts to generalize this differential equation using different coefficients for diffusion [7]:

$$\frac{\partial u_i(t, X)}{\partial t} = (f_i(u_1(t, X), \dots, u_n(t, X)) + d_i \Delta u_i(t, X))$$

$$i \in \overline{1, n}.$$

In the framework of which the theory of how to build models of complex biological processes on the basis of differential equations was built.

But this theory did not give an answer how to find the equation in a more general form:

$$\frac{\partial u(t, X)}{\partial t} - (f(u(t, X)) + D \Delta u(t, X)) = 0.$$

Where  $D$  is the matrix  $n \times n$  diffusion coefficients.

As it turns out, it is not enough to search for a matrix only in the form in which it is positive definite ( $x^T D x \geq 0$ ). And therefore simple theories may not give all the models that can be in nature. But recently, Google Research started working on Differentiable Self-organizing Systems [5], which made it possible to try to expand the area of searching for models for patterns [6].

In this way, a more qualitative model of how the skin of the gopher (*Ictidomys tridecemlineatus*) and the patterns on it are formed. It was compared with existing methods [8] and theories [7] and it was shown that it is more effective for modeling complex patterns.

## II. LIFE QUALITY OPTIMIZATION TASK

Let's consider the case when the algorithm built a mathematical model that is able to extend the life of an organism by maintaining the stability of the state  $u_{healthy}$  under some simplified conditions.

That is, a vector of optimal parameters  $c$  was found for the following problem with an operator:  $T_c$ :

$$u_t = T_c(u) = A(u, \Delta u, c),$$

$$(u_{healthy})_t = T_c(u_{healthy})$$

$$F(u_0, c) = \int dist(u(t, X), u_{healthy}(X)) dt \rightarrow min$$

where  $u(t, X) = (u_1(t, X), u_2(t, X), \dots, u_n(t, X))$  - vector of spatio-temporal distribution of metabolic processes and epigenetic configurations.

Now if we need to get the model parameters for a bit of a pain detailed model.

$$u_t = A_\epsilon(u, \Delta u, c),$$

$$A_0 = A.$$

We can get a problem that even with a small step, an eigenvalue may appear in the linear expansion of the operator  $A_\epsilon(u, \Delta u, c)$  at the point  $u_{healthy}$  which has a real part equal to or greater than 0.

### III. USING THE TEMPLATE

We obtain a linearized equation for  $\delta$  - a small deviation from  $u_{healthy}$ :

$$\delta_t = a_{\epsilon, u_{healthy}}(\delta, \Delta \delta, c).$$

Let's take the maximum eigenvalue by its real part for  $a_{\epsilon, u_{healthy}} - \lambda_\epsilon$ .

$$\text{We have what } \Re(\lambda_\epsilon) = \ln \left( \|e^{a_{\epsilon, u_{healthy}}}\|_2 \right).$$

From what we have that if  $a_{\epsilon, u_{healthy}}$  - changes continuously according to the norm  $\|\cdot\|_2$  over the variable  $\epsilon$  we have  $\Re(\lambda_\epsilon)$  - changes continuously. And therefore, in the case of the appearance of instability in pattern formation during growth  $\epsilon$  will be the minimum value  $\epsilon_1$  for which  $\Re(\lambda_{\epsilon_1}) = 0$ .

Suppose we chose  $\epsilon$  in such a way that  $\lambda_\epsilon$  the only eigenvalue with  $\Re(\lambda) \geq 0$ .

For this eigenvalue, consider the eigenvector  $u_{\lambda_\epsilon}(X)$ .

Then, with initial values  $u_0$  close to  $u_{healthy}$  we will have a problem close to a linearized one:

$$\delta_t = a_{\epsilon, u_{healthy}}(\delta, \Delta \delta, c).$$

Which  $\delta(t, X) = k(t)u_{\lambda_\epsilon}(X)$  at

$$k'(t) = \lambda_\epsilon k(t).$$

$$k(t) = k(0)e^{\lambda_\epsilon t}.$$

$$\delta(t, X) = k(0)e^{\lambda_\epsilon t}u_{\lambda_\epsilon}(X)$$

We have that  $\delta(t, X) = k(0)e^{\lambda_\epsilon t}u_{\lambda_\epsilon}(X)$  - the main long-term component that takes you out of the health zone and leads to death.

It is worth emphasizing that this component is not necessarily a visible process, it may be some kind of invisible process that takes the system out of the stability zone, within which normal reactions become inadequate or lead to the creation of cancerous tumors.

For this model it is enough to study:

$$FailComponent(t) = \frac{u(t, X) - u_{healthy}(t, X)}{\|u - u_{healthy}\|_B}$$

To supervisedly train our system to avoid this component without having huge random steps due to finite growth and high sensitivity, we can use gradient descent with gradient normalization and exponential smoothing:

$$g_i = \frac{grad_c F(u_0, c_i)}{\|grad_c F(u_0, c_i)\| + \epsilon}$$

$$G_i = \beta g_i + (1 - \beta)G_{i-1}$$

$$\bar{g}_i = \frac{1}{1 - \beta^{i+1}} G_i$$

$$c_{i+1} = c_i - \alpha \bar{g}_i$$

If we look at this procedure as a specific approach, it focuses on a deeper understanding of the processes during a healthy state, deep enough to analyze small long-term changes and find the accumulating and increasing components and optimize the dynamics of the body to eliminate this instability.

### REFERENCES

- [1] DA Klyushin, SI Lyashko, VV Pavlychko Model-Based Analysis of Biological Tissue Heating by Point Ultrasound Sources. // Journal of Automation and Information Sciences, - 2010, - vol. 42, Issue 2, - p. 44-50.
- [2] Weinan, E. Principles of Multiscale Modeling; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2011; ISBN 9781107096547
- [3] Alber, M., Buganza Tepole, A., Cannon, WR, De, S., Dura-Bernal, S., Garikipati, K., ... & Kuhl, E. (2019). Integrating machine learning and multiscale modeling—perspectives, challenges, and opportunities in the biological, biomedical, and behavioral sciences. NPJ digital medicine, 2(1), 115.
- [4] He, Z. The control mechanisms of heart rate dynamics in a new heart rate nonlinear time series model. Sci Rep 10, 4814 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61562-6>
- [5] Mordvintsev, A., Randazzo, E., Niklasson, E., & Levin, M. (2020). Growing neural cellular automata. Distill, 5(2), e23.
- [6] Mordvintsev, A., & Niklasson, E. (2021).  $\mu$ NCA: Texture Generation with Ultra-Compact Neural Cellular Automata. arXiv preprint arXiv:2111.13545.
- [7] Murray, JD (2001). Mathematical biology II: Spatial models and biomedical applications (Vol. 3). New York: Springer.
- [8] de Gomensoro Malheiros, M., Fensterseifer, H., & Walter, M. (2020). The leopard never changes its spots: realistic pigmentation pattern formation by coupling tissue growth with reaction-diffusion. ACM Transactions on Graphics (TOG), 39(4), 63-1.



# *Problems of developing an expert system for industrial fish farming under martial law conditions*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.070>

Serhii Datsyshyn

Postgraduate Student, National University of Water and Environmental Engineering,  
[s.b.datsyshyn@nuwm.edu.ua](mailto:s.b.datsyshyn@nuwm.edu.ua)

Olha Michuta

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, National University of Water and Environmental Engineering,  
[o.r.michuta@nuwm.edu.ua](mailto:o.r.michuta@nuwm.edu.ua)

**Abstract** – The article addresses the main challenges faced by the industrial fish farming sector in Ukraine during wartime. Military actions negatively impact the infrastructure and personnel of fish farms, causing issues with supply chains, logistics, qualified personnel, and the environmental condition of water bodies. The author emphasizes the difficulties in maintaining stable operations of enterprises, particularly due to economic factors such as reduced investments, increased tax burden, and rising production costs. The article proposes steps to mitigate these challenges, including the creation of wintering ponds, the breeding of in-house stocking material, reducing the number of fish stock to maintain ecological balance, and focusing on herbivorous fish species and catfish that are less dependent on purchased feed.

**Keywords:** fish farming, cost, expert system, martial law.

Considerations in Developing an Expert System for Industrial Fish Farming under War Conditions

Military actions pose threats to infrastructure and personnel, complicating the stable operation of fish farms. Service intervals increase due to unstable feeding and the delayed administration of necessary medicinal and preventive treatments, affecting the quality and quantity of the final product. The loss of qualified workers due to mobilization or migration complicates the maintenance of a high level of expertise and efficiency. Hiring new workers without experience in the field and their training creates additional financial burdens on producers.

Disruption of logistical chains complicates the supply of feed, equipment, and other necessary resources. Border blockades and the reorientation of enterprises to other markets or products create additional financial burdens in the search for new suppliers.

Military actions may lead to water pollution, which negatively affects fish health and product quality. Unfortunately, the environmental problems associated with war cannot be solved with an expert system for industrial fish farming, as they are unpredictable.

Economic difficulties are perhaps the most critical factor caused by the war. The conflict impacts the economy, leading to reduced funding and investments in the fish industry. Reduced purchasing

power, increased tax burden on producers, and rising production costs may result in a negative financial balance for enterprises.

To address the economic challenges caused by military actions, we propose the following steps in developing an expert system for industrial fish farming:

The creation of wintering ponds will enable the sale of products over a longer period, as the supply increases significantly during the autumn fishing season, causing a drop in product prices.

Focusing the enterprise on breeding its own stocking material will reduce the cost of the final product.

Reducing the amount of stocking material will reduce the negative impact on the ecological condition of water bodies, which is caused by fish waste and feed decomposition. This, in turn, will lower costs for administering necessary medicinal and preventive treatments.

Focusing on herbivorous fish species such as white silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*), white amur (*Ctenopharyngodon idella*), carp (*Carassius*), and common or European catfish, whose food base consists of benthic invertebrates and amphibians. This will reduce financial costs for feed and, consequently, the production cost.

## REFERENCES:

1. Ghibadullin O.V., Dunaev I.V. On the Way to Sustainable Industrial Recovery and Development of Ukraine: A Study of Regional Systems in Wartime. *State Construction*. 2023. № 2 (34). pp. 105–124. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-2337-2023-2-09>
2. Fishery of Ukraine: Development Trends, Problems, and Solutions. DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.48> *Tavriya Scientific Bulletin. Series: Agricultural Sciences / Kherson State Agrarian and Economic University*. Odesa: Helvetyka Publishing House, 2023. Issue 133. 384 p.
3. Melnychenko S., Bohadorova L., Okhremenko I., Kozychar M., & Reznikova V. (2024). The dynamics of catching aquatic bioresources in the south of Ukraine: Analysis, challenges, and prospects for their solution in the context of sustainable development. *Scientific Horizons*, 27(8), 158-167. doi: 10.48077/scihor8.2024.158.

# Digital education: data technologies and informative knowledge

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.071>

Ibraim Didmanidze  
Batumi Shota Rustaveli State University  
Batumi, Georgia  
[ibraim.didmanidze@bsu.edu.ge](mailto:ibraim.didmanidze@bsu.edu.ge)

Didar Didmanidze  
Batumi Shota Rustaveli State University  
Batumi, Georgia  
[ddidari1966@gmail.com](mailto:ddidari1966@gmail.com)

Givi Tsitskishvili  
Batumi State Maritime Academy  
Batumi, Georgia  
[givi.tsitskishvili@gmail.com](mailto:givi.tsitskishvili@gmail.com)

Vladimir Zaslavsky  
Taras Shevchenko National University of Kyiv  
Kyiv, Ukraine  
[zas@unicyb.kiev.ua](mailto:zas@unicyb.kiev.ua)

**Abstract** – By focusing on computational tools, the present report shows how it is possible to improve awareness of what the educational task is intended to achieve, and it describes the correct methodological foundations and appropriate approach for carrying out a designed digital task. Practical examples demonstrate important research points: a variety of data storage issues and the technical topic of relational databases. A digital education resource that demonstrates how data technologies are used to accomplish tasks in a research environment. It analyses enabling factors that can support quality, equity and efficiency in the use of digital technologies in education systems. A program of digital research in educational practice can be characterized as an attempt to marry the interpretation of possible worlds of logic with probabilistic reasoning. It can be said that the discussed concept stands out as one of the most fundamental contributions of information theory to the practice of digital education and is clearly relevant for a number of technical issues, such as the inductive logarithm problem.

**Keywords** – Digital education, Data technologies, informative knowledge.

## I. INTRODUCTION

First of all, we need to understand the traditional lexical meaning of the concept of "Digital Education" which is often found in pedagogical literature and regulatory documentation. "It is well known for us that the term "Digital Education" has several meanings: In a general sense, the term "digital education" is understood as "education" in the digital age, referring to all nuances of meaning of the concept of education" [3]. It seems that "it is planned to create some analytical theoretical standards" [3] and mental understanding the essence and characteristics of the "spontaneous" cyber socialization of society and information potential in it should be fundamentally different from understanding the enabling factors and patterns of digitalization of education, just as the processes of assimilation of knowledge differ from their pragmatically application. We may say that digital education technologies are now

a key resource for a contemporary education system. If used effectively, they promise to transform teaching and learning practices, to reduce learning inequalities and to create more inclusive and efficient education systems.

## II. THE THEORETICAL PART

In our personal opinion, the emergence of moral problems of digital education in the world and its literal "intoxication" occurred under the influence of some objective factors that almost coincided in time:

- Advances in cognitive sciences, claiming that the mechanisms of information processing by the human brain and the computer are identical phenomenon - called as "computer metaphor" or "Artificial Intelligence";
- Inheritance of the approach to valuable management, developed in the now forgotten creative programming modeling - the predecessor of digital nature;
- The emergence of the intellectual industry of personal computers, a variety of digital devices and cybernetic equipment necessary for their virtual discursive operation;
- Competitive business pressure: all these intelligence must be sold, and the education system is an inexhaustible banal market.

We must note here that An Emeritus Professor of Learning and Adaptive Systems of the University of Amsterdam Pieter Adriaans' information theory is one of the modern approaches that unequivocally states that digital practice lacks semantic potential, in particular, the latest quantitative information measures, in particular, all scientific knowledge, in terms of universal distribution, essentially do not consider the semantic component. Moreover, the universal distribution proposed by digital practice "encodes all possible mathematical knowledge and, when updated based on empirical observations, will in principle converge to the optimal scientific model of our world" [1]. We know that many well-known learning algorithms, like decision tree induction, support vector machines, normalized information distance and neural networks, use entropy based information measures to

extract meaningful and useful models out of large data bases. “Data has changed decision-making patterns and removed barriers in data analysis. Today, it appears as a logical continuation and natural evolution of the digital revolution, and contributes to the implementation of new processes, habits and uses. Data technology sector includes solutions for data management, and products or services that are based on data generated by both human and machines” [5]. This means that the machine does not provide the processes of creativity even in the case when it carries out educational simulation, sets the mode of “intellectual game”, although it is indisputable that it is in this function that the use of a computer is most promising. It helps the teacher to create a learning environment that does not provide the formation of students' thinking, but contributes to it. The historical material presented in the traditional scientific base suggests that informational reflection and logical knowledge are historically much more intertwined than has generally been known. Thus, digital teaching devices are the embodiment of rigorous mathematical, engineering, technocratic thought, and the educational process is based on psychological and pedagogical, largely subjective patterns of the activities of teachers and students, starting with their human motivation and ending with intuitions and personal meaning of transmitted and received educational information.

According to recent research, in epistemological world view context, some “educational procedures exhaust the possibilities of operating with ready-made information fixed in the memory of the machine” [2]. And “a real dialogue is an objective dialectical contradiction of the subject of discussion realized in communication, which even the most modern machine cannot master, it does not understand the contradiction” [2]. In addition, “the computer evaluates the introduction of conflicting information with a symbolical assessment. The only advantage of the computer, we will add, is the incredibly high speed of the electrical signal passing along the path specified by the moral program of the decision-making process” [2]. Along with that, it is interesting for us the work on the “Issue of Student Distance Communication and Collaboration” which explores efforts to build capacity for digital education among actors at all levels of the education system: educators, institution leaders, parents, students and administrators. In addition to common capacity challenges that impede the effective use of digital education technologies, the research presents some promising approaches to building digital capacity: “Education is not reducible to the downloading of information, much less to the passive and solitary activity of staring at a screen” [4], or more: “Education is an inter-subjective and social process, involving hands-on activity, spontaneity, and the communal experience of sharing in the learning enterprise” [4].

### 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](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: DTMS'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 1, 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>

# *Problems of automating the use of land resources by local government under martial law*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.072>

Vasyl Drozd  
National University of Water and Environmental  
Engineering  
v.v.drozd@nuwm.edu.ua

Olha Michuta.  
National University of Water and Environmental  
Engineering  
o.r.michuta@nuwm.edu.ua

**Abstract** – This article examines the challenges related to the automation of land resource management by local government during martial law in Ukraine. The war has led to the suspension of many land operations, the closure of electronic services, and difficulties in accessing data from the State Land Cadastre. In addition, there have been issues with communication between authorities, limited access to information on land plots, technical difficulties, and financial constraints that complicate land resource management projects. Military actions have also caused land contamination, requiring additional measures for their restoration. The author emphasizes the need for a comprehensive approach to solving these problems through close cooperation between different levels of government and the use of modern technologies to overcome existing obstacles

**Keywords:** land, cadastre, local government, martial law.

While studying the issue of automating the use of land resources by local government in Ukraine, it is important to consider the limitations caused by the implementation of martial law.

At the beginning of the war, many land operations were suspended, and electronic databases were closed. [1] Free land privatization was effectively halted, the State Land Cadastre was closed, and popular services displaying cadastre data, such as the Public Cadastral Map (kadastr.live), were shut down. In the absence of their own geoinformation systems, land accounting systems, and up-to-date cartographic materials, the work of local governments in the field of land management was paralyzed. [2] A nationwide campaign called "Gardens of Victory" was launched, aimed at the effective use of available land plots and channeling all resources toward growing food to prevent a food crisis in Ukraine. [3] However, over time, the functioning of the State Land Cadastre was restored, and the work of land management organizations resumed.

The next problem in organizing land resource management involved technical and organizational difficulties, such as insufficient communication between participants in land relations and limited access to necessary resources. The issue of local governments (hereinafter LGs) obtaining up-to-date

information on registered land plots remains a challenge. This was partially resolved by the introduction and opening of limited access to the National Geospatial Data Infrastructure Geoportal and the State Register of Real Property Rights through the State Enterprise "National Information Systems". LGs can selectively receive information about land plots and their owners or users but do not have the ability to automatically obtain large volumes of information. During the war, the relevance of the Law of Ukraine "On Personal Data Protection" increased, causing difficulties in the exchange of information between LGs, the State Geo Cadastre, tax authorities, and migration services.

Economic challenges, of course, affected every community. The war impacted the economic situation, complicating the funding of land management projects and the implementation of reforms. The community's budget is directed toward addressing the primary needs of the community. For example, on July 24, 2021, the Law of Ukraine "On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding Land Use Planning" came into force, which introduced changes to the Land Code of Ukraine and other legislative acts related to land use planning. The law introduced comprehensive planning for the development of the territories of amalgamated territorial communities. The preparation of a comprehensive plan for the spatial development of a community's territory is an expensive document, which was already a burden for LGs even before the full-scale invasion.

Environmental problems also added additional strain on the community's budget. Military actions caused pollution and degradation of land, requiring additional measures for the protection and restoration of land resources. A new type of land contaminated by military activities has effectively emerged. [4]

These problems require a comprehensive approach and cooperation between different levels of government to address them.

An alternative to automating the use of land resources by local governments under martial law is the use of geoinformation systems widely available on the global market. We focused on QGIS (formerly known as "Quantum GIS")—a free, cross-platform geographic information system (GIS). QGIS is one of the most functional and user-friendly desktop GIS and is

## Modeling, control and information technologies – 2024

dynamically developing. [5] The greatest advantage of QGIS is its free nature, the ability to customize it for each user with the help of plugins and buttons, and its compatibility with file formats such as JavaScript Object Notation (JSON) Shape. JSON files, in particular, are used by the State Geo Cadastre for data exchange..

### REFERENCES

[1] Khavar Ю., Sai B., & Malibroda C. (2023). Peculiarities of land management under martial law . Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Architecture and Construction, (24), 177–183. <https://doi.org/10.31734/architecture2023.24.177>

[2] Use of agricultural land under martial law. [https://www.asterslaw.com/press\\_center/legal\\_alerts/use\\_of\\_agricultural\\_land\\_under\\_martial\\_law/](https://www.asterslaw.com/press_center/legal_alerts/use_of_agricultural_land_under_martial_law/)

[3] Сади перемоги. <https://sadyperemohy.org/>

[4] Правові проблеми охорони та відновлення земель під час дії воєнного стану в Україні. МісінкевичЛ.Л., МісінкевичА.Л. Університетські наукові записки, 2022, № 5-6(89-90), С. 27-34.unz.univer.km.ua

[5] QGIS UserGuide[https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user\\_manual/index.html](https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/index.html).



# Convective-thermal drying simulation to reduce the damage of the grain in convective plants

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.073>

Bogdana Gayvas

National Academy of Sciences of Ukraine  
Lviv, Ukraine  
bogdana.gayvas@gmail.com

Anatolii Dmytruk

Lviv Polytechnic National University  
Lviv, Ukraine  
anatolii.a.dmytruk@lpnu.ua

**Abstract** – A physical-mathematical model is proposed for analyzing the process of drying the bed of one-type granular materials in a convective drying chamber under the action of a drying agent in order to optimize this process and reduce the percentage of grain damage. The basic relations of the coupled problems of mechano-diffusion and mass transfer for the considered grain are written, taking into account the heterogeneity of the grain structure (core and coat) and its position in the bed. The moisture concentration and the radial displacement vector are chosen as determining functions. On the basis of the obtained solutions of changes in moisture concentration in grain over time, taking into account the heterogeneity of the grain structure and the rate of blowing the drying agent for the intergranular medium, a numerical analysis of changes in moisture concentration, temperature, displacements and deformations in grain over time are carried out, taking into account taking into account the physical and chemical characteristics of the grain. It is found that the temperature of the drying agent has the greatest influence on drying (movement, deformation, grain stress).

**Keywords** – physico-mathematical model, drying process, granular materials, convective drying chamber, optimization, grain damage, interconnected equations

## I. INTRODUCTION

Grains, by their structure, are capillary-porous colloidal bodies [1], in which the mechanism of mass transfer during dehydration is determined by the form and energy of moisture bonding with the material, its structure, moisture content, and drying conditions. The work [2] analyzes the factors determining the technological properties of grain during post-harvest processing. The physicochemical properties of grain depend on external conditions that change during drying, hydrothermal processing, and grain storage. Grain is a physiological culture consisting of an embryo, endosperm (kernel), and husks. The morphological structure (thickness of husks and aleurone layer), vitreosity, and chemical composition (content of proteins and starch) of wheat grain were studied in the work [3]. Internal moisture transfer in the grain is purely diffusive [4]. Water permeability changes the structural-mechanical properties of the endosperm, and contributes to the formation of microcracks, and its loosening. The difference in the structure of husks and endosperm affects not only the absorption or removal of moisture but also physicochemical processes that change the volume of grain and the structure of the endosperm,

therefore, it is necessary to account for this heterogeneity in the models describing processes of grain treatment. One more problem is that protein in grain at temperatures above permissible, undergoes denaturation, reducing its ability to swell, which is important for seed germination. Thus during drying it is important to prevent such a denaturation as well as traumas of the grain in general. According to scientists, each percentage of injuries in the seed material reduces its yield [5]. Therefore, mathematical modeling of grain drying processes in convective chambers is an urgent scientific task due to its practical importance in the agriculture and food industry. The model presented in this work is aimed at facilitating the development of efficient drying technologies, leading to improved grain preservation and reduced post-harvest losses. The main theoretical principles and methods of modeling convective drying are presented in the work [6].

## II. FORMULATION OF THE PROBLEM AND GOVERNING SYSTEM OF EQUATIONS

We consider a layer of thickness  $L$ , which is composed of identical moist grains of radius  $R$ , and it is referred to the Cartesian coordinate system so that the  $Oz$  axis is perpendicular to its surfaces. Each grain is considered a two-layered sphere, so-called, of an equivalent volume, which is referred to a spherical coordinate system with the origin at its center ( $r=0$ ). The drying process of the sphere occurs through its outer contact surface  $r=R$  with the intergranular medium. The moisture concentration  $c_z$  at the location of the selected grain along the layer thickness  $z$  will be determined from solving the mass transfer problem in the intergranular space, where the air-vapor mixture is uniformly filtered in the mode of complete displacement.

We consider each sublayer of the sphere as a two-component solid solution consisting of particles of the main component (matrix) and water. Under isothermal conditions, the determining functions are taken to be the vector of radial displacements  $u_r^{(i)}$  and the moisture concentration  $c^{(i)}$ . Then, for each individual sphere, these functions are found from the solution of the coupled equations of mechano-diffusion, which in the spherical coordinate system take the form:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 u_r^{(i)})}{\partial r} \right] - \xi^{(i)} \beta^{(i)} \frac{\partial c^{(i)}}{\partial r} = 0,$$

$$\frac{\partial (rc^{(i)})}{\partial \tau} = D^{(i)} \frac{\partial^2 (rc^{(i)})}{\partial r^2} - D_\varepsilon^{(i)} \frac{\partial^2 (r\varepsilon^{(i)})}{\partial r^2}, \quad (1)$$

where  $\xi^{(i)} = 3K^{(i)} / (3K^{(i)} + 4G^{(i)})$  is the mechanical constant,  $\varepsilon^{(i)} = \partial u_r^{(i)} / \partial r + 2u_r^{(i)} / r$ ;  $D^{(i)}$  is the diffusion coefficient;  $D_\varepsilon^{(i)}$  is the coefficient of the influence of the gradient of the volume deformation field on the mass flow;  $K^{(i)}$  is the bulk modulus;  $G^{(i)}$  is the shear modulus;  $\beta^{(i)}$  is the concentration coefficient of volumetric expansion;  $\tau$  is time. Here, the index  $i=1$  corresponds to the inner area ( $0 \leq r \leq r_*$ ), and  $i=2$  corresponds to the outer area ( $r_* \leq r \leq R$ ) of the sphere.

We assume that at the initial time ( $\tau = 0$ ), radial displacements are zero, and concentrations are constant:

$$u_r^{(i)} = 0, \quad c^{(i)} = c_0^{(i)} \quad (i=1,2). \quad (2)$$

On the surface of the sphere  $r = R$ , which is free from external loads, the condition  $\hat{\sigma}^{(2)} \cdot \vec{n} = 0$ , where  $\hat{\sigma}$  is the stress tensor,  $\vec{n}$  is the normal to the surface, is written as follows [7]:

$$\sigma_{rr}^{(2)} = \left( K^{(2)} + \frac{4}{3} G^{(2)} \right) \frac{\partial u_r^{(2)}}{\partial r} + 2 \left( K^{(2)} - \frac{2}{3} G^{(2)} \right) \frac{u_r^{(2)}}{r} - \beta^{(2)} K^{(2)} c^{(2)} = 0 \quad (3)$$

We assume that the density of the diffusion flow at the surface of the sphere  $J_R^{(2)}$  is proportional to the difference in moisture concentrations at the surface of the grain  $c_R^{(2)}$  and in the intergranular space  $c_z$ , i.e.,

$$-D^{(2)} \frac{\partial c^{(2)}}{\partial r} \Big|_{r=R} + D_\varepsilon^{(2)} \frac{\partial \varepsilon^{(2)}}{\partial r} \Big|_{r=R} = k (c^{(2)} - c_z). \quad (4)$$

Here,  $k$  is the mass transfer coefficient.

The moisture transfer equation in the intergranular space of the layer is as follows [8]:

$$\frac{\partial c_z}{\partial t} + v \frac{\partial c_z}{\partial z} = D_z \frac{\partial^2 c_z}{\partial z^2} + J, \quad (5)$$

where  $v$  is the velocity of movement of the air-vapor mixture in the layer;  $D_z$  is the moisture diffusion coefficient in the intergranular medium;  $J = \alpha J_R$  is the intensity of the local moisture source due to evaporation from individual grains,  $\alpha$  is a coefficient depending on the size of the grains (radius) and their packaging (cubic, volume-centered, or face-centered, etc.) [7].

The process of convective diffusion in the intergranular space of the layer, composed of identical grains, is much faster compared to the process of moisture diffusion from the volume of the grain to its surface. Therefore, we will further analyze the drying

process of the layer in a quasi-static approximation, i.e., we will determine the moisture concentration  $c_z$  from the solution of the equation

$$D_z \frac{d^2 c_z}{dz^2} - v \frac{dc_z}{dz} + J = 0 \quad (6)$$

in which the function  $J$  is known function of time. Eq. (6) is solved under the boundary conditions:

$$c_z \Big|_{z=0} = 0, \quad c_z \Big|_{z=L} = c_z^n. \quad (7)$$

Here  $c_z^n$  is the concentration of saturated vapor at the selected temperature.

### III. ALGORITHM DEVELOPMENT FOR THE MOISTURE CONTENT DISTRIBUTION PROBLEM

Let us denote

$$\mathcal{G}^{(i)}(r, z, \tau) = c_z(z) - c^{(i)}(r, z, \tau). \quad (8)$$

Then the system (1) we write in the following form

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 u_r^{(i)})}{\partial r} \right] = \frac{\partial \varepsilon^{(i)}}{\partial r}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon^{(i)}}{\partial r} = -\xi^{(i)} \beta^{(i)} \frac{\partial \mathcal{G}^{(i)}}{\partial r}, \quad (9)$$

where  $\tilde{D}^{(i)} = D^{(i)} - \xi^{(i)} \beta^{(i)} D_\varepsilon^{(i)}$  is an effective diffusion coefficient. In this case, the initial and boundary conditions take the form [7]

$$\mathcal{G}^{(i)} \Big|_{\tau=0} = c_z(z) - c^{(i)} \Big|_{\tau=0}, \quad \mathcal{G}^{(1)} \Big|_{r=0} \neq \infty, \quad \frac{\partial \mathcal{G}^{(1)}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0,$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}^{(2)}}{\partial r} \Big|_{r=R} + H \mathcal{G}^{(2)} \Big|_{r=R} = 0. \quad (10)$$

Here  $H = kR/D$ .

Equality of flows at the interfaces of the sublayers of the grain  $r = r_*$  gives us

$$\tilde{D}^{(1)} \frac{\partial \mathcal{G}^{(1)}}{\partial r} = \tilde{D}^{(2)} \frac{\partial \mathcal{G}^{(2)}}{\partial r}. \quad (11)$$

Solution of the boundary value problem (9)-(11) we search in the form:

$$r \mathcal{G}^{(i)} = \Theta^{(i)}(r) T^{(i)}(\tau). \quad (12)$$

For the functions  $\Theta^{(i)}, T^{(i)}$ , we have

$$\frac{d^2 \Theta^{(i)}}{dr^2} + \frac{\mu^2}{\tilde{D}^{(i)}} \Theta^{(i)} = 0, \quad \frac{dT^{(i)}}{d\tau} + \mu^2 T^{(i)} = 0, \quad (13)$$

where  $\mu$  is the parameter of the problem.

The solutions to these equations are functions [7]

$$\Theta^{(i)} = \tilde{A}^{(i)} \cos(\lambda^{(i)} r) + \tilde{B}^{(i)} \sin(\lambda^{(i)} r),$$

$$T^{(i)}(\tau) = \tilde{K}^{(i)} e^{-\mu^2 \tau}, \quad (14)$$

which, using the dimensionless variable  $\bar{r} = r/R$ , can be written as [7]

$$\Theta^{(i)} = \tilde{A}^{(i)} \cos(\lambda_R^{(i)} \bar{r}) + \tilde{B}^{(i)} \sin(\lambda_R^{(i)} \bar{r}),$$

$$T^{(i)}(\tau) = \tilde{K}^{(i)} e^{-\mu^2 \tau}, \quad (15)$$

where  $\tilde{A}^{(i)}, \tilde{B}^{(i)}, \tilde{K}^{(i)}$  are constants,  $\lambda_j^{(i)} = \mu_j / \sqrt{\tilde{D}^{(i)}}$ ,  $\lambda_R^{(i)} = \lambda^{(i)} R$ .

For the region  $0 \leq r < r_*$ , taking into account the boundedness of the solution  $\mathcal{G}^{(r,\tau)}$ , if  $r=0$ , we put  $\tilde{A}^{(j)} = 0$  and we can write

$$\mathcal{G}^{(1)}(r, \tau) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{\infty} B_j^{(1)} \sin(\lambda_R^{(1)} \bar{r}) e^{-\mu_j^2 \tau}, \quad (16)$$

while in the region  $r_* \leq r \leq R$  we have [7]

$$\mathcal{G}^{(2)}(r, \tau) = \frac{1}{r} \left[ A_j^{(2)} \cos(\lambda_j^{(2)} r) + B_j^{(2)} \sin(\lambda_j^{(2)} r) \right] e^{-\mu_j^2 \tau}. \quad (17)$$

Here  $A_j^{(i)}, B_j^{(i)}$  are the coefficients of the expansion of  $\tilde{A}^{(i)}, \tilde{B}^{(i)}$  in a series with respect to the eigenvalues  $\mu_j$  of the corresponding characteristic equation obtained from the conditions (9), (10). We have

$$\begin{aligned} p_{11} A_j^{(2)} + p_{12} B_j^{(2)} &= 0, p_{21} A_j^{(2)} + p_{22} B_j^{(2)} + a_{11} p_{23} B_j^{(1)} = 0, \\ p_{33} B_j^{(1)} - (c_z - c_0^{(1)}) &= 0. \end{aligned} \quad (18)$$

where  $c_0$  is the concentration value  $c^{(1)}$  for  $r=0, \tau=0$ .

$$\begin{aligned} p_{11} &= a_{21} \cos \lambda_{Rj}^{(2)} + \lambda_{Rj}^{(2)} \sin \lambda_{Rj}^{(2)}, \\ p_{12} &= a_{21} \sin \lambda_{Rj}^{(2)} - \lambda_{Rj}^{(2)} \cos \lambda_{Rj}^{(2)}, \\ p_{21} &= \cos(\lambda_{Rj}^{(2)} \bar{r})_* + \lambda_{Rj}^{(2)} \bar{r}_* \sin(\lambda_{Rj}^{(2)} \bar{r}_*), \\ p_{22} &= \sin \lambda_{Rj}^{(2)} \bar{r}_* - \lambda_{Rj}^{(2)} \bar{r}_* \cos \lambda_{Rj}^{(2)} \bar{r}_*, \\ p_{23} &= -a_{11} \left[ \sin(\lambda_{Rj}^{(1)} \bar{r})_* - \lambda_{Rj}^{(1)} \bar{r}_* \cos(\lambda_{Rj}^{(1)} \bar{r}_*) \right], \\ p_{33} &= \lambda_j^{(1)}, \\ a_{21} &= \left( -1 + \frac{kR}{\tilde{D}^{(2)}} \right), a_{11} = d^2, \\ \mu_j r_* / \sqrt{\tilde{D}^{(1)}} &= d \lambda_{Rj}^{(2)} \bar{r}_*, \bar{r} = r / R, \\ \mu_j r_* / \sqrt{\tilde{D}^{(1)}} &= \lambda_{Rj}^{(2)} \bar{r}_* \quad d = \sqrt{\tilde{D}^{(1)}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Determinant of the system (18) is

$$\Delta(\mu) = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ 0 & 0 & p_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} p_{11} p_{12} \\ p_{21} p_{22} \end{vmatrix} p_{33}. \quad (20)$$

Expanding the determinant (20), we obtain the characteristic equation of the problem

$$t\mathcal{G} \left[ \lambda_{Rj}^{(2)} (1 - \bar{r}_*) \right] = \lambda_{Rj}^{(2)} \frac{(1 - \bar{r}_*)}{a_{21} + (\lambda_{Rj}^{(2)})^2 \bar{r}_*}. \quad (21)$$

Let us note that as  $\bar{r}_*$  approaches zero, we obtain the characteristic equation [9] for a homogeneous sphere. By the roots  $\lambda_{Rj}$  of this equation, we find

$$\mu_j = \lambda_j^{(2)} \sqrt{\tilde{D}^{(2)}} \text{ and correspondingly } \lambda_j^{(1)}, \lambda_j^{(2)}.$$

The roots  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_j$  of the characteristic equation (21) are real values. To each root corresponds a solution of equations (16) and (17) as follows:

$$\mathcal{G}^{(i)}(r, \tau) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{\infty} \Theta_j^{(i)} e^{-\mu_j^2 \tau},$$

where  $A_j^{(1)} = 0$ ,  $i=1, 2$ ;  $j=1, 2, \dots, \infty$ . (22)

In dimensionless form, we have:

$$\mathcal{G}^{(1)}(\bar{r}, \bar{z}) = \frac{1}{\bar{r}} \sum_{j=1}^{\infty} B_j^{(1)} \sin(\lambda_R^{(1)} \bar{r}),$$

$$B_j^{(1)} = \mathcal{G}^{(1)}(0, \bar{z}, 0) = (c_z(\bar{z}, 0) - c(0, \bar{z}, 0)) / \lambda_j^{(1)}.$$

$$\mathcal{G}^{(2)}(\bar{r}, 0) = \frac{1}{\bar{r}} \sum_{j=1}^{\infty} \left[ A_j^{(2)} \cos(\lambda_{Rj}^{(2)} \bar{r}) + B_{Rj}^{(2)} \sin(\lambda_{Rj}^{(2)} \bar{r}) \right].$$

To determine  $A_j^{(2)}, B_j^{(2)}, B_j^{(1)}$ , let us denote by  $\Delta_k(\mu_j)$  ( $k=1, 3$ ) the algebraic adjunct  $\Delta_{il}$  of the  $l^{\text{th}}$  element  $p_{il}$  of the  $i^{\text{th}}$  row of the determinant  $\Delta(\mu_j)$ , respectively. In particular,

$$\Delta_1(\mu_j, 1, \bar{r}_*) = f p_{12} p_{23}, \quad \Delta_2(\mu_j, 1, \bar{r}_*) = -f p_{11} p_{23},$$

$$\Delta_3(\mu_j, 1, \bar{r}_*) = f (p_{11} p_{22} - p_{21} p_{12}), \quad f = \mathcal{G}^{(1)}(0, \bar{z}, 0). \quad (23)$$

It is easy to see that the constants  $A_j^{(2)}, B_j^{(2)}, B_j^{(1)}$  corresponding to the root  $\mu_j$  are related to the algebraic complements by the relations:

$$\frac{A_j^{(2)}}{\Delta_1(\mu_j)} = \frac{B_j^{(2)}}{\Delta_2(\mu_j)} = \frac{B_j^{(1)}}{\Delta_3(\mu_j)} = M_j.$$

Hence

$$A_j^{(2)} = M_j \Delta_1(\mu_j), \quad B_j^{(2)} = M_j \Delta_2(\mu_j), \quad B_j^{(1)} = M_j \Delta_3(\mu_j)$$

Using the concept of orthogonality of eigenfunctions (22) for  $\mathcal{G}^{(i)}(r, z, 0) = c_z(z, 0) - c_0^{(i)}(r, z, 0) = \text{const}$ , we determine the coefficients  $M_j$  [10].

Using  $M_j$  defined by the relation (24), we can find  $A_j^{(2)}, B_j^{(2)}, B_j^{(1)}$ . The moisture concentration in an individual grain depending on its position coordinate  $\bar{z}$  within the layer is determined by the formula (8):  $c^{(i)}(r, \bar{z}, \tau) = c_z(\bar{z}) - \mathcal{G}^{(i)}(r, \bar{z}, \tau)$ . To determine  $c_z(z)$ , it is necessary to solve Eq. (6) with the corresponding boundary conditions.

#### IV. COMPUTER ANALYSIS OF CONVECTIVE DRYING

Based on these solutions, changes in moisture concentration in the grain depending on the air blowing velocity, the location of the grain in the layer, and the thickness of the wheat endosperm was studied. The following experimental data were taken into account for the calculation: moisture concentration at the initial time  $c_0 = 5 \cdot 10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup>; grain layer thickness  $L = 1000$  mm; grain volume  $V = 16.77$  mm<sup>3</sup>; effective moisture diffusion coefficient  $\tilde{D}^{(2)} = 1.34 \cdot 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>/s; reduced mass transfer coefficient  $H = 10^{-7}$ ; equivalent grain radius  $R = 2.00086$  mm; Fourier number  $Fo = 2.00086 \cdot 10^{-7}$ ; diffusion coefficient  $D_z = 10^2$  mm<sup>2</sup>/s; saturated vapor concentration  $c_z^n = 1.34 \cdot 10^{-3}$ ; mechanical constant  $\xi = 3K / (3K + G) = 0.5$ ;  $\nu = 0.2$ ;  $E = 16.4 \cdot 10^3$  g/mm<sup>2</sup>; volumetric expansion

$\beta = -2.71389 \cdot 10^{-4}$  mm/s; shear modulus  
 $G = 6.8333 \cdot 10^3$  g/mm<sup>2</sup>; bulk modulus  
 $K = 9.11111 \cdot 10^3$  g/mm<sup>2</sup>; the heterogeneity boundary  
 $r_* = 0.9R$ .

V. CONCLUSIONS

A physical-mathematical model is proposed for optimizing the drying process of homogeneous granular materials in a convective chamber to reduce grain damage. Relations for mechano-diffusion and mass transfer, considering grain structure heterogeneity, are outlined. Moisture concentration and radial displacement are key functions. Numerical analysis reveals a significant impact of the blowing rate of the drying agent on drying. Knowing the changes in moisture concentration and temperature, we can determine the stress-strain state of the grains, which allows for adjusting the drying process in convective-type drying plants to prevent grain cracking by not exceeding the grain's strength limit during drying.

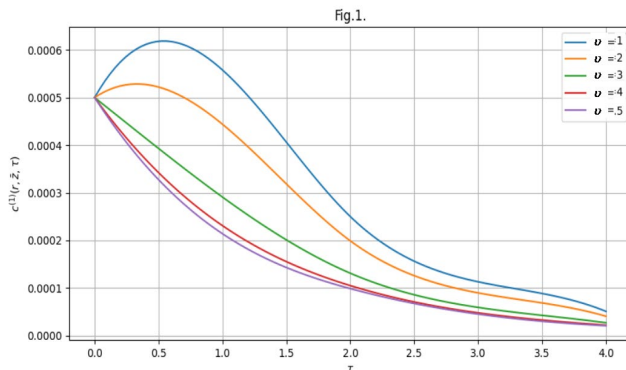


Fig. 1. Moisture concentration distribution over time in a grain's core  $r=0.05R$  for different values of  $\nu=1, 2, 3, 4, 5$  for  $\bar{z}=0.5$

After the first hour of drying the grain with the rate of blowing  $\nu=1$  and 2, we observe moisture accumulation inside the grains, the magnitude of which even exceeds the initial moisture content of the grain (Fig. 1, blue and orange curves). During two hours, there is rapid drying of the material, which continues into the third and fourth hours, but not as intensively. By the fifth hour of drying, it reaches a steady state.

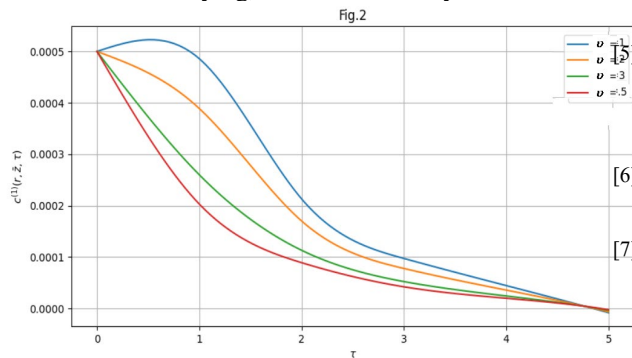


Fig. 2. Moisture concentration distribution over time in a grain's coat  $r=0.95R$  for different values of values of  $\nu=1, 2, 3, 4, 5$  for  $\bar{z}=0.5$

In contrast, in the coat, moisture gradually begins to decrease after the first hour of the process for most rates of blowing (Fig. 2, orange, green and red curves). Further on, the drying processes in the core and the coat synchronize. The most effective drying of the grain occurs with the rates of blowing  $\nu=4, 5$  (Fig. 1, 2 violet and red curves).

REFERENCES

- [1] Rudobashta S., Zueva G., Muravleva E. *et al.* Mass Conductivity of Capillary-Porous Colloidal Materials Subjected to Convective Drying. *J Eng Phy Thermophy* 91, 845–853 (2018). doi.org/10.1007/s10891-018-1808-x
- [2] Bendinelli W., Su C., Péra T., Filho J. What are the main factors that determine post-harvest losses of grains? *Sustain Prod Consum*, 21, 228-238 (2020) doi.org/10.1016/j.spc.2019.09.002.
- [3] Ahmad A., Liaqat C., Nayik G., Farooq U. Chemical Composition of Cereal Grains. In: *Cereal Grains: Composition, Nutritional Attributes, and Potential Applications*. Taylor & Francis Group. (2023) doi: 10.1201/9781003252023-4
- [4] Chen X.D. (2007) Moisture Diffusivity in Food and Biological Materials, *Dry Technol.*, 25 (7-8), 1203-1213, doi: 10.1080/07373930701438592
- [5] Chen D., Hein G.L., Adams-Selin R., Wang L., Zhang J., Zhou X., Ma H., McMechan J., Shi Y. Spatial relationship between pre-harvest hail and the impact from the wheat streak mosaic disease complex by using remote sensing data, *Crop Protection*, 179, 106627 (2024) doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106627
- [6] Hayvas B., Dmytruk V., Torskyk A., Dmytruk A. On methods of mathematical modeling of drying dispersed materials. *MMC*. 4 (2), 139-147 (2017). doi.org/10.23939/mmc2017.02.139
- [7] Gayvas B., Dmytruk V., Kaminska O., Pastyrska I., Dmytruk A., Nezgoda S. Simulation of Crack Resistance of Mustard in Pulsed Drying Mode. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2, 91–94 (2020). doi: 10.1109/CSIT49958.2020.9321941
- [8] Luikov A. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *Int J Heat Mass Transf.* 18 (1), 1-14 (1975). doi.org/10.1016/0017-9310(75)90002-2
- [9] Gayvas B., Markovych B., Dmytruk A., Havran M., Dmytruk V. Numerical modeling of heat and mass transfer processes in a capillary-porous body during contact drying. *MMC*, 10 (2), 387–399 (2023). doi.org/10.23939/mmc2023.02.387
- [10] Gayvas B., Markovych B., Dmytruk A., Dmytruk V., Kushka B., Senkovych O. Study of contact drying granular materials in fluidized bed dryers. *IEEE XXVIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)*, Tbilisi, Georgia. (2023), 238-241. doi: 10.1109/DIPED59408.2023.10269464.

# *Assessment of dynamic contact of the bent part of the drill string with the wall of the directed well*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.074>

Yaroslav Grydzhuk

Ivano-Frankivsk National Technical University  
of Oil and Gas  
Ivano-Frankivsk, Ukraine  
[jaroslav.gridzhuk@gmail.com](mailto:jaroslav.gridzhuk@gmail.com)

Orest Slabyi

Ivano-Frankivsk National Technical University  
of Oil and Gas  
Ivano-Frankivsk, Ukraine  
[burewisnyk@gmail.com](mailto:burewisnyk@gmail.com)

Taras Kondur

Ivano-Frankivsk National Technical University  
of Oil and Gas  
Ivano-Frankivsk, Ukraine  
[tkondur@gmail.com](mailto:tkondur@gmail.com)

**Abstract** – Taking into account the specifics of the stress-strain state of the bent part of the drill string pressed against the well wall, as well as the geometry of their mutual spatial arrangement, the analytical method of determining the area of their contact forses zone is substantiated.

**Keywords** – drill string, well, stress-strain state, contact area, torus, cylinder.

## I. INTRODUCTION

During the design of the axial load on the bit at the intervals of inclined and horizontal sections of wells, it is necessary to take into account the forces of resistance to the movement of the drill string, since the axial load, which is created by the layout of the drill string, is not completely transmitted to the rock-breaking tool. This feature is one of the reasons for the decrease in the rate of deepening of wells. Of significant interest are the issues of research into the process of further (subcritical) deformation of the drill string, when the latter continues to change its shape under the action of axial load, distributed contact forces and torque as a result of being pressed into the well walls with geometric imperfections. In addition, it is important to know the value of the contact pressure and the area of the visco-elastic interaction zones of the bent sections of the drill string with the walls of the well, at which the established drilling process takes place.

## II. PRESENTATION OF THE MATERIAL

In the process of drilling, the configuration of the wellbore does not have a constant rectilinear cylindrical shape. One of the reasons for the formation of formations on the walls of the well is the mechanical action on it of the drill string, which has lost its stability [1, 2].

The force of pressing the drill pipes against the walls of the well is determined by the own weight of the drill string elements, their structural parameters, bending elasticity, pressure drop and the full value of hydrostatic pressure. Its increase helps to improve the adhesion of the drill string to the filter crust [3, 4].

Therefore, information about the actual values of the forces acting in the places of interaction of individual sections of the drill string with the walls of the well, the shape and area of the contact zones will allow to more accurately design the dimensions of the pit layouts, prevent the formation of gutters and determine the most vulnerable sections of the drill string. Many scientific works are devoted to the solution of these questions.

Some of the authors do not take into account the contact area, taking into account only linear contact along the entire length of the pipe string, others take a conditional value equal to a certain fraction of half the diameter when the drill string is pressed against the well wall [3, 4, 5]. Despite this, the contact of various elements of the pipe (lock, pipe body) with the walls of the well covered with a filter crust in the case of possible rubbing of the gutters on the wall of the mine is not taken into account.

Therefore, when considering the problems of the contact interaction of the drill string sections with the walls of the well, an important issue is the determination of the areas of the contacting surfaces. The dimensions of the areas of the contacting surfaces will significantly affect the parameters of the stress-strain state of the drill string and well walls and may cause changes in the dimensions of the design profile [3, 4].

Due to the lack of accurate analytical formulas for determining the area of contact interaction zones between drill string elements and well walls, drilling in practice is currently limited to empirical dependencies [5, 6].

Consider the process of pressing a bent half-wave drill string into the well wall. We will assume that the base of the well wall is a substance with elastic-anisotropic properties, and its surface is covered with a solid filter crust. Upon local contact with the viscous surface of the well wall, the drill string continues to



press into it with the subsequent formation of a trough-like surface until the maximum reaction of the wall becomes equal to the maximum force of elastic compression.

When the bent part of the column is finally pressed against the wall, its reaction reaches its maximum value, and the compression speed becomes zero. The results of the analysis of the stress-strain state of the deformed section of the drill string [1, 2] and the process of its compression into the well wall provide the opportunity to generate the necessary data for setting and solving the geometric problem of determining the area of the zone of their mutual contact.

With sufficient accuracy, the outer surface of the section of the drill string bent in a plane parallel to the borehole axis can be identified with the surface of the torus section, and the inner surface of the well wall with the surface of a circular cylinder [7] (Fig. 1). The equation of the torus with the radius of the generating circle  $r$  and the distance from the center of this circle to the axis (center) of the torus  $R$  is given in the following form:

$$(x^2 + y^2 + z^2 + R^2 - r^2)^2 - 4R^2(x^2 + y^2) = 0, \quad (1)$$

and of a circular cylinder with the radius of the generating circle  $\rho$  is given as follows:

$$x^2 + y^2 - \rho^2 = 0. \quad (2)$$



Figure. 1 Contact of the bent part of the drillstring with the cylindrical wall of the well

To determine the pressure of the moving point of the surface of the drill string on the stationary surface of the well wall in the projections on the axis of the rectangular Cartesian coordinate system, the following system of equations of motion must be compiled:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_x + N_x \frac{1}{\Delta f} \frac{\partial f}{\partial x} - k|N| \frac{\dot{x}}{|\bar{v}|} \\ m\ddot{y} = F_y + N_y \frac{1}{\Delta f} \frac{\partial f}{\partial y} - k|N| \frac{\dot{y}}{|\bar{v}|} \\ m\ddot{z} = F_z + N_z \frac{1}{\Delta f} \frac{\partial f}{\partial z} - k|N| \frac{\dot{z}}{|\bar{v}|} \end{cases} \quad (3)$$

where  $m$  – the mass of the bent section of the drill string brought to the point of contact with the well wall;  $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$  – projections of the acceleration of the combined mass movement;  $F_x, F_y, F_z$  – projections of external

active forces;  $f(x, y, z) = 0$  – the equation of the superimposed bond (walls of the well);  $N_x, N_y, N_z$  – projections of the elm reaction on the ortho normal to the surface;  $\bar{v}$  – the average value of the speed of movement of the combined mass;  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$  – projections of the speed of movement of the combined mass;  $k$  – dynamic coefficient of friction;

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}. \quad (4)$$

A cylinder should be chosen as the elm surface superimposed on the drill string in the directed rectilinear section of the well, and then the partial derivative equations (2) in equations (4) should be determined. After substituting equations (4) into the system of equations (3), it is possible to determine the projection of the reaction of the well wall.

### III. CONCLUSIONS

Taking into account the geometric dimensions of the cross-sections and forms of deformation of the drill string and well, with the help of equations (1-4) it is possible to analytically determine the contact forces of the bent section of the drill string with the wall of the well.

The implementation of this method will make it possible to more accurately estimate the forces of resistance to the movement of the drill string and its contact pressure on the walls of the directed and horizontal sections of the wells when designing the axial load on the bit. Also, this method will be useful in the study of the process of closed deformation of the drill string during the established drilling process.

### REFERENCES

- [1] Ja. Grydzhuk, I. Chudyk, A. Velychkovych, A. Andrusyak. Analytical evaluation of inertial properties of the range of the drill string in its rotation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. №1/7 (97). P. 6-14.
- [2] I.Chudyk, P.Raiter, Ya. Grydzhuk, L. Yurych. Mathematical model of oscillations of a drill tool with a drill bit of cutting-scraping type. Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2020, № 1 P. 52-57.
- [3] I.Chudyk, Ja. Grydzhuk Influence of deformation parameters on drill string dynamics. Materials of the international scientific & practical conference Physical & chemical geotechnologies 2020 (program of reports) November 04.11.2020, Dnipro. P. 45-46.
- [4] I. Chudyk, A. Velychkovych, Ja. Grydzhuk. A Modeling of the Inertia Properties of a Drill String Section as a Continual Bent Rotating Rod. SOCAR Proceedings No.4 (2021) 024-032 P. 24-32.
- [5] Ja. Grydzhuk, A.Dzhus, A.Yurych, L. Yurych, M.Dorokhov, A.Livinskiy. Improving the technique for assessing the condition and predicting the wear of the rock destruction tool equipment. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022, 4(1-118), pp. 103–109.
- [6] T. Kondur, Ja. Grydzhuk, A. Dzhus, A. Livinskiy, V. Mykhailiuk, A. Yurych. Modern trends in improving drilling efficiency of oil and gas wells. XVII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment” 7–10 November 2023, Kyiv, Ukraine.
- [7] M. Bembenek, Ya. Grydzhuk, B. Gajdzik, L. Ropyak, M. Pashechko, O.Slabyi, A. Al-Tanakchi, T. Pryhorovska. An Analytical-Numerical Model for Determining “Drill String-Wellbore” Frictional Interaction Forces. Energies 2024, 17 (2), 301. P. 1-18.

# Generalized Active Contour Model in BV Space and its Application to Satellite Remote Sensing of Agricultural Territories

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.075>

Peter Kogut

Dept. of Mathematical Analysis and Optimization

Oles Honchar Dnipro National University

Dnipro, Ukraine

[peter.i.kogut@gmail.com](mailto:peter.i.kogut@gmail.com)

**Abstract** – We develop a novel approach to the domain decomposition basing on the novel anisotropic version of the Chan-Vese active contour model for a special domain decomposition problem which is motivated by huge number of different applications especially the satellite image segmentation under the remote sensing of the Earth surface.

**Keywords** – component, formatting, style, styling, insert.

We discuss a new variational problem which is suggested by applications to satellite image segmentation. Since the satellite images are an important source for extracting landscape boundaries and other vegetation structures which can provided extremely useful insights for applications in environmental monitoring, agriculture, forestry, and other related fields. In particular, in agricultural crop field classification, one of a fundamental problem is to provide a disjunctive decomposition of a fixed domain onto finite number of nonempty subsets such that each of these subsets could be associated with a crop that is grown in this area, or with a forest regions, or water zones, and so on, and this correspondence must be established at rather high level of accuracy. Up-to-date and accurate crop maps (or crop field classification) are needed to update agricultural statistics, to provide agricultural crop yield prediction, and are often used in environmental modeling. Typically, such association between a given region and some agricultural crop can be made through the detection and quantitative assessment of green vegetation which is one of the major application of remote sensing studies.

Thus, each pixel of the original image can be associated with the corresponding VI-feature. The problem, which is suggested by application to remote sensing satellite image processing, consists in computing a decomposition of the domain  $\Omega$  of a given image such that

- the VI-characteristic varies smoothly and/or slowly within each subset of  $\Omega$ ;
- the VI-characteristic varies discontinuously and/or rapidly across most of the boundary between different subsets.

As distinguished features of this statement is that we cannot reduce it to the standard settings of segmentation

problem (see, for instance, the Mumford-Shah energy based model and others) are the following ones:

- Each region of  $\Omega$  should consist of pixels that can be reasonably grouped according to the VI-characteristic. Simultaneously, these regions should be easy to differentiate according to the chosen image feature;
- The respective interiors of image regions should have a more or less simple geometry without gaps. Boundaries of image regions should be smooth enough but also accurate with respect to the chosen image feature;
- The most restrictive obstacle in the construction of such decomposition is the fact that these subdomains should not overlap the borders between fields or contain any fragments of such borders, meaning that they cannot take in even small parts of different fields with arguably different crops.

All of these makes the above mentioned segmentation problem rather challenging. It is enough to observe that a precise consideration of this problem demonstrates that the quantitative interpretation of remote sensing information from vegetation is a complex task. Many studies have limited this interpretation by assumption that the extracting vegetation information uniformly and smoothly distributed within the particular crop fields. However, this assumption is evidently broken when trying to apply these type vegetation indices on heterogeneous canopies such as plantations with a mixed combination of soil, weeds, and other crops, or plantation where the vegetation of interest has different VI-characteristic due to spacial variability.

The main idea, we realize in the new setting of variational problem, can be briefly described as follows. We propose to make use of the so-called  $f$ -decomposition instead the standard Chan-Vese 'active contours without edges' model. The role of the function  $f$  in such decomposition has to guarantee that the new objects after the  $f$ -decomposition will have homogeneous values of the target function  $f$  withig each separate field. Thus, we formulate the segmentation problem as a constrained minimization problem in a special anisotropic BV space, where the 'effect of anisotropy' we associate with the structure topology of VI-distribution.

# *Point spectrum as a profile of beliefs in conflict models*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.076>

Volodymyr Koshmanenko

National Academy of Sciences of Ukraine  
Kyiv, Ukraine  
koshman63@gmail.com

Oksana Satur

National Academy of Sciences of Ukraine  
Kyiv, Ukraine  
orlassat@gmail.com

**Abstract** – This article examines the emergence of point spectra in discrete dynamical conflict systems and their role in belief formation within a society. By studying the structure and convergence of conflict trajectories to limit states, we analyze the conditions under which a discrete point spectrum emerges. A mathematical model is developed to describe the formation of individuals' beliefs through conflict interaction. The study focuses on systems where the number of possible beliefs is limited, examining both the aggregation of individual beliefs and the constraints that arise with multiple beliefs. The results show that while two beliefs can always be aggregated, the presence of three or more leads to more complex dynamics, where only a pair of individuals can be grouped by a common belief. The results provide insights into the formation of belief clusters in societies and offer a framework for understanding informational influence on conflict patterns.

**Keywords** – dynamical conflict system, conflict transformation (interaction), point spectrum, stochastic vector.

Many mathematical models describe the process of beliefs formation and dissemination in society (for example, see [1]-[4]). Such models are very relevant for studying the dynamics of social networks, political systems, and other social structures where groups of individuals interact and gradually come to a common opinion. They allow modeling decision-making processes, including the influence of trust, limited confidence and mutual influence on the formation of collective opinion. These models are also applicable in areas such as the management of complex systems, economics and even in technologies where consistency between different components of the system is required.

For example, in [4], a mathematical model is proposed that describes the process of reaching consensus in systems with interacting agents. It examines the behavior of agents when making decisions in systems with two or more alternatives. Special cases of interaction between two agents and large groups are studied, and generalizations are given for cases with several alternatives. The key aspect is the gradual convergence of agent opinions through interaction, which leads to consensus.

This article proposes a method for constructing such models based on the concept of a conflict dynamic system and the interpretation of the phenomenon when a continuous spectrum is concentrated in a discrete

spectrum. The study of the proposed belief model is carried out in terms of the structure of the point spectrum in time-limited events in discrete dynamic conflict systems of the form

$$\{\mu^t, \nu^t\} \xrightarrow{*} \{\mu^{t+1}, \nu^{t+1}\}, \quad t = 0, 1, \dots,$$

where the probabilistic measures  $\mu^t$  and  $\nu^t$  are associated with stochastic matrices describing the states of a pair of alternative opponents, and  $*$  denotes a non-commutative transformation that models conflict interaction between the opponents.

The spectral properties of the limiting measures  $\mu^\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \mu^t, \nu^\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \nu^t$  have already been studied in several papers [5]-[14]. In particular, it has been established that, in the general case, the distributions of the limiting measures  $\mu^\infty$  and  $\nu^\infty$  are pure singularly continuous and have a fractal structure (see [5, 6, 10]). In [14], it was shown that the class of singularly continuous limiting distributions forms a set of full measure in the space of all limiting states of dynamical systems of this type. Point, particularly discrete, limiting spectrum can only arise in specific cases, with very rapid (exponential) local concentration of the approximating distributions  $\mu^t$  and  $\nu^t$  (see [11]).

The construction of an abstract model of a dynamical conflict system (see [13]) is determined by fixing three objects:  $\Omega, \mathcal{M}^{ss}(\Omega), *$  specifically, the space  $\Omega$ , the family of measures  $\mathcal{M}^{ss}(\Omega)$  and the conflict transformation  $*$ . Here,  $\Omega$  refers to any space in which the conflict between opponents unfolds. Physically, this represents a territory for the distribution of a certain resource. Mathematically, in the simplest case,  $\Omega$  is the interval  $[0,1]$  with the Lebesgue measure. It is important that the space  $\Omega$  allows for the procedure of structural subdivision into subsets, as described further.

In the class of all structurally similar measures  $\mathcal{M}^{ss}(\Omega)$  on the space  $\Omega$  with a fixed primary measure  $\lambda$  we define three subclasses:  $\mu \in \mathcal{M}_{pp}$  – measures with a purely point spectrum,  $\mu \in \mathcal{M}_{ac}$  – the measures are absolutely continuous with respect to  $\lambda$ , and the measures  $\mu \in \mathcal{M}_{sc}$  – are singularly continuous with respect to  $\lambda$ . Each structurally similar measure,  $\mu \in \mathcal{M}^{ss}$ , belongs to only one of the subclasses:  $\mathcal{M}_{ac}, \mathcal{M}_{pp}$  or  $\mathcal{M}_{sc}$ , which do not intersect.

At the initial moment of the discrete time  $t = 0$ , a pair of alternative opponents, denoted by A and B, choose strategies for distributing the statuses of their presence in the  $\Omega$  space, as in a territory that is divided into separate regions:

$$\Omega = \bigcup_{i_0=1}^n \Omega_{i_0}, \quad 2 \leq n < \infty.$$

The starting strategies of the opponents are fixed by sets of numbers:  $p_{i_0} \geq 0$  for A and  $r_{i_0} \geq 0$  for B, the values of which characterize the statuses of the opponents in each of the regions  $\Omega_{i_0}$  with weight  $\lambda_{i_0}$ . We assume that these values have the meaning of the probabilities of the presence of opponents A and B in  $\Omega_{i_0}$ , i.e.  $p_{i_0} := \mathbf{P}(A \uparrow \Omega_{i_0})$ ,  $r_{i_0} := \mathbf{P}(B \uparrow \Omega_{i_0})$ , where the symbol  $\uparrow$  denotes the presence of the opponent in the region.

Therefore, at the moment  $t = 0$ , the strategy of each of the opponents is fixed by the corresponding stochastic vector,

$$\mathbf{p}^0 = (p_{01}, \dots, p_{0i}, \dots, p_{0n}), \quad \mathbf{r}^0 = (r_{01}, \dots, r_{0i}, \dots, r_{0n}),$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} p_{0i} = \sum_{i=1}^{\infty} r_{0i} = 1.$$

Next, we will assume that in the general case the coordinates  $p_{i_0} \equiv p_{0i}$ ,  $r_{i_0} \equiv r_{0i}$  are strictly positive and different:

$$p_i^0, r_i^0 > 0, p_i^0 \neq r_i^0, (\mathbf{p}^0, \mathbf{r}^0) = \sum_{i=1}^n p_i^0 r_i^0 \neq 1. \quad (3)$$

In the general case, the measures  $\mu^t = \mu_{p^t}$ ,  $\nu^t = \nu_{r^t}$ ,  $t = 1, 2, \dots$ , which are constructed iteratively by  $\mu_{p^{t-1}}$ ,  $\nu_{r^{t-1}}$  according to this rule. The elements of the first  $k \leq t$  columns of the matrices  $P^t$ ,  $R^t$  are given by the coordinates  $p_{ik} \equiv p_i^k$ ,  $r_{ik} \equiv r_i^k$ ,  $i \in \overline{1, n}$  by vectors

$$\mathbf{p}^0, \mathbf{p}^1, \dots, \mathbf{p}^k, \quad \mathbf{r}^0, \mathbf{r}^1, \dots, \mathbf{r}^k,$$

the coordinates of which are determined according to the formulas:

$$p_i^k \equiv p_{ik} = p_i^{k-1} \cdot \frac{1 - r_i^{k-1}}{1 - \theta^{k-1}},$$

$$r_i^k \equiv r_{ik} = r_i^{k-1} \cdot \frac{1 - p_i^{k-1}}{1 - \theta^{k-1}}, \quad (4)$$

$$\theta^{k-1} := \sum_{i=1}^n p_i^{k-1} r_i^{k-1}.$$

The above-described procedure of initial measures sets one of the possible transformations for describing successive acts of conflict interaction between opponents in discrete time. We denote this transformation by  $*$ . It generates trajectories of a dynamic conflict system,

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu^{t-1} \equiv \mu_{p^{t-1}} \\ \nu^{t-1} \equiv \nu_{r^{t-1}} \end{array} \right\} \xrightarrow{*} \left\{ \begin{array}{l} \mu^t \equiv \mu_{p^t} \\ \nu^t \equiv \nu_{r^t} \end{array} \right\}, \quad t = 1, 2, \dots \quad (7)$$

the states of which are fixed by a pair of measures associated with the corresponding stochastic matrices.

In the case  $\mathbf{p}^0, \mathbf{r}^0 \in \mathbb{R}_{+,1}^{n=2}$  both measures  $\mu^\infty, \nu^\infty$  associated to the limit matrices  $P^\infty, R^\infty$  are purely point,  $\mu^\infty, \nu^\infty \in \mathcal{M}_{pp}$ . In other case, when  $\mathbf{p}^0, \mathbf{r}^0 \in \mathbb{R}_{+,1}^{n>2}$ , one of the limit measures  $\mu^\infty, \nu^\infty$  will be purely point,  $\mu^\infty \in \mathcal{M}_{pp}$ , or  $\nu^\infty \in \mathcal{M}_{pp}$  if there exists only one index  $1 \leq \mathbf{i} \leq \infty$  for vector  $\mathbf{p}^0$ , or  $1 \leq \mathbf{j} \leq \infty$  for vector  $\mathbf{r}^0$ , such that one of the inequalities holds, respectively:

$$p_i^0 > r_i^0 \quad \text{or} \quad p_j^0 < r_j^0 \quad (8)$$

At the same time, if  $\mu^\infty \in \mathcal{M}_{pp}$ , then  $\nu^\infty \in \mathcal{M}_{sc}$  and vice versa if  $\nu^\infty \in \mathcal{M}_{pp}$ , then  $\mu^\infty \in \mathcal{M}_{sc}$ . If none of the inequalities (8) holds, then both limit measures are singularly continuous:  $\mu^\infty, \nu^\infty \in \mathcal{M}_{pp}$ . In any case, the limit measures  $\mu^\infty, \nu^\infty$  invariant with respect to the transformation  $*$ .

Let's consider a fixed family of measures  $\mathcal{S} = \{\mu_\alpha \in \mathcal{M}^{ss}\}_{\alpha \in I}$  on the measurable space  $(\Omega, \Lambda)$ . The measures  $\mu_\alpha$  represent the states of individuals from an abstract society  $\mathcal{S}$ , identified by an index  $\alpha$ . The size of the society is finite,  $\#I = m < \infty$ .

Under informational influence, the state of each individual changes in discrete time as  $\mu_\alpha = \mu_\alpha^t$ . The change law is given by the transformation  $*$ , which describes the conflict interaction with a fixed measure  $\nu \in \mathcal{M}^{ss}$ . The evolution of each individual's state over time occurs differently. If one of the limit measures has a point spectrum,  $\mu_\alpha^{t=\infty} \in \mathcal{M}_{pp}$ , we interpret this as the formation of one of  $1 \leq \mathbf{i} \leq n$  beliefs. The number of individuals who develop a certain belief depends on the strategy of informational influence, determined by the structure of  $\nu$ .

At the initial moment each individual  $\alpha \in I$  corresponds to a measure  $\mu^0(\alpha)$  associated with a matrix  $P(\alpha)$  of type (1), where the first column is given by the coordinates of some stochastic vector  $\mathbf{p}^0(\alpha) \in \mathbb{R}_{+,1}^n$ ,  $n \geq 2$ . The evolution of the states  $\mu_\alpha^t$ ,  $t = 0, 1, \dots$ , as well as the emergence of a point spectrum (i.e., the formation of a certain belief  $\mathbf{i}$  among the individuals in society  $\mathcal{S}$ , is described by conflict interaction according to the rule (7), where the measure  $\nu_{r^0} \in \mathcal{M}^{ss}$  is fixed by some vector  $\mathbf{r}^0 \in \mathbb{R}_{+,1}^n$ . This measure is associated with the source of informational influence. The vector  $\mathbf{r}^0$  can naturally be associated with the strategy of informational influence since it determines the possibility of forming a certain belief  $\mathbf{i}$ .

According to analysis of the point spectrum structure, different limit distributions may arise for each of the measures  $\mu_\alpha^t \in \mathcal{S}$ . For  $\mu_\alpha^\infty \in \mathcal{M}_{pp}$ , meaning that a specific belief  $\mathbf{i}$  is formed in the corresponding individual, it is necessary and sufficient (see Theorem 4) that the following conditions hold in terms of the initial vector coordinates:

$$p_i^0(\alpha) > r_i^0, \quad p_i^0(\alpha) < r_i^0$$

Naturally, as before, to avoid additional explanations, we assume that all coordinates of the initial vectors  $\mathbf{p}^0(\alpha)$  are non-zero.

Let  $I_i(\mathbf{r}^0)$  denote the subset of individuals for whom, under the influence of a fixed information source with strategy  $\mathbf{r}^0$  belief  $\mathbf{i}$  has been formed. The task is to investigate the dependence of the value  $\#\{I_i(\mathbf{r}^0)\}$  (the

number of individuals with a fixed belief  $1 \leq i \leq n$ ) the number of individuals with a fixed belief  $\mathbf{r}^0$ , the strategy of informational influence.

**Theorem 1.** If  $n = 2$ , then for a family  $\mathcal{S}$  of any arbitrary but finite cardinality  $\#\{I\} = m < \infty$ , there always exists a vector  $\mathbf{r}^0$  such that  $\#\{I_i(\mathbf{r}^0)\} = m$  for both beliefs  $i = 1, 2$ .

In the case where there are only two beliefs among all individuals in an abstract society, it is possible to form a single belief by choosing an appropriate strategy of informational influence. However, when there are three possible beliefs, i.e., when  $n = 3$ , a similar result does not hold, even for a society of three individuals. Nevertheless, any two arbitrary individuals from a finite society can always be united by one of the three possible beliefs.

**Theorem 2.** Let  $n = 3$ ,  $\#\{I\} = m < \infty$  for any pair of vectors  $\mathbf{p}^0(\alpha), \mathbf{p}^0(\beta)$ , there exists a vector  $\mathbf{r}^0$  such that conditions (8) are simultaneously satisfied for  $\alpha$  and  $\beta$  for both beliefs  $1 \leq i \leq 3$ .

Let us denote by  $\mathcal{S}_i$  the subset of all related individuals. For a fixed belief  $1 \leq i \leq n$  individuals  $\alpha, \beta \in I$  are called related if the following conditions hold:

$$p_i^0(\alpha), p_i^0(\beta) < \frac{1}{n}, \quad \forall i \neq \mathbf{i}.$$

When there are more than three possible beliefs, it is generally impossible to unite any pair of individuals by a common belief. However, if the number of beliefs is significantly smaller than the number of individuals, clusters of individuals close to a certain belief inevitably arise in the vector space corresponding to the individuals from  $\mathcal{S}$ , since their number exceeds the number of possible beliefs. The following theorem states that all related individuals can be united by a single common belief.

**Theorem 3.** For each set  $\mathcal{S}_i$  there exists a vector  $\mathbf{r}^0$  such that conditions (8) are fulfilled simultaneously for all  $\alpha \in \mathcal{S}_i$ , therefore, all measures with  $\mu^\infty(\alpha)$ ,  $\alpha \in \mathcal{S}_i$  have the same spectral profile.

The author expresses gratitude for partial financial support for the project "Mathematical modeling of

complex dynamical systems and processes relevant to state security"(No. 0123U100853).

#### REFERENCES

- [1] F. Baumann, P. Lorenz-Spreen, I. M. Sokolov, M. Stardini, "Modeling Echo Chambers and Polarization Dynamics in Social Networks", *Physical Review Letters*, 2020, vol. 124, 048301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.048301.
- [2] A. F. Peralta, J. Kertész, G. Iñiguez, "Opinion dynamics in social networks: From models to data", In T. Yasseri (Ed.), *Handbook of Computational Social*.
- [3] A. Sirbu, D. Pedreschi, F. Giannotti, J. Kertész, "Algorithmic bias amplifies opinion fragmentation and polarization: a bounded confidence model", *PLOS ONE*, 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0213246
- [4] O.R. Satur, N.V. Kharchenko, "A Model of Dynamical System for the Attainment of Consensus", *Ukr Math J.*, 2020, vol. 71, pp. 1456–1469, DOI: 10.1007/s11253-020-01725-w
- [5] S. Albeverio, V. Koshmanenko, and G. Torbin, "Fine Structure of the Singular Continuous Spectrum", *Methods of Functional Analysis and Topology*, vol. 9 (2), 2003, pp. 101–119.
- [6] S. Albeverio, V. Koshmanenko, M. Pratsiovytyi, et al., "Spectral properties of image measures under infinite conflict interactions", *Positivity*, vol. 10, 2006, pp. 39–49, DOI: 10.1007/s11117-004-0001-1.
- [7] V. D. Koshmanenko, "Recovery of the spectral type of marginal distributions in dynamic conflict systems", *Ukr. Math. J.*, vol. 59 (6), 2007, pp. 771–784.
- [8] T. Karataieva, V. Koshmanenko, "Origination of the singular continuous spectrum in the conflict dynamical systems", *Methods Funct. Anal. Topology*, 2009, 14 (1), pp. 309–319.
- [9] V. D. Koshmanenko, "Quasi-point spectral measures in the theory of dynamic conflict systems", *Ukr. Math. J.*, 2011, vol. 63 (2), pp. 187–199, DOI: 10.1007/s11253-011-0452-0.
- [10] S. Albeverio, V. Koshmanenko, M. Pratsiovytyi, et al., "On fine structure of singularly continuous probability measures and random variables with independent  $\tilde{Q}$ -symbols", *Methods Funct. Anal. Topology*, 2011, vol. 17 (2), pp. 97–111.
- [11] V. Koshmanenko, V. Voloshyna, "The emergence of point spectrum in models of conflict dynamical systems", *Ukr. Math. J.*, 2018, vol. 70 (12), pp. 1615–1624, DOI: 10.1007/s11253-018-1514-x.
- [12] V. Koshmanenko, O. Satur, V. Voloshyna, "Point spectrum in conflict dynamical systems with fractal partition", *Methods Funct. Anal. Topology*, 2019, vol. 25 (4), pp. 324–338.
- [13] V. Koshmanenko, "Spectral Theory for Conflict Dynamical Systems", Kyiv: Naukova Dumka, 2016, 287 p.
- [14] V. D. Koshmanenko, "The complete measure of the set of singularly continuous measures", *Ukr. Math. J.*, 2009, vol. 61 (1), pp. 83–91.



# *Modeling Nodes and Cells of Neuron-Equivalentors as Accelerators of Equivalental-Convolutional Self-Learning Neural Structures*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.077>

Vladimir Krasilenko  
Vinnytsia National Agrarian University  
VNAU  
Vinnytsia, Ukraine  
krasvg@i.ua

Diana Nikitovich  
Vinnytsia National Technical University  
VNTU  
Vinnytsia, Ukraine  
diananikitovych@gmail.com

Alexander Lazarev  
Vinnytsia National Technical University  
VNTU  
Vinnytsia, Ukraine  
krasvg@i.ua

**Abstract**— In the paper, we consider the urgent need to create highly efficient hardware accelerators for machine learning and deep convolutional neural networks (CNNs), for associative memory models, clustering, and pattern recognition. We show a brief overview of our related works the advantages of the equivalent models (EM) for describing and designing bio-inspired systems. The capacity of neural net on the basis of EM and of its modifications is in several times quantity of neurons. Such neuro-paradigms are very perspective for processing, clustering, recognition, storing large size, strongly correlated, highly noised images and creating of uncontrolled learning machine. And since the basic operational functional nodes of EM are such vector- matrix or matrix-tensor procedures with continuous- logical operations as: normalized vector operations "equivalence", "nonequivalence", and etc., we consider in this paper new conceptual approaches to the design of full-scale arrays of such neuron-equivalentors (NEs) with extended functionality, including different activation functions. Our approach is based on the use of analog and mixed (with special coding) methods for implementing the required operations, building NEs (with number of synapsis from 8 up to 128 and more) and their base cells, nodes based on photosensitive elements and CMOS current mirrors. Simulation results show that the efficiency of NEs relative to the energy intensity is estimated at a value of not less than  $10^{12}$  an. op. / sec on W and can be increased. The results confirm the correctness of the concept and the possibility of creating NEs and MIMO structures on their basis.

**Keywords**— accelerator; neural net; convolutional neural network; neuron-equivalentor; current mirror; vector-matrix procedure; equivalental model.

## I. INTRODUCTION, OVERVIEW, ANALYSIS OF PUBLICATIONS AND FORMULATION OF WORK GOAL

For many applications applied in the creation of biometric systems, machine vision systems are necessary to solve the problem of object recognition in images. The basis of most known methods and

algorithms is to compare two different images of the same object or its fragment. Discriminant measure of the mutual alignment reference fragment with the current image, the coordinate offset is often a mutual two-dimensional correlation function. In paper [1, 2, 3] it was shown, that to improve accuracy and probability indicators with strong correlation obstacle-damaged image, it is desirable to use recognition methods based on mutual equivalently 2D spatial functions, nonlinear transformations and adaptive-correlation weighting. For the recognition and clustering of images, various models of neural networks are also used. Equivalental models (EM) of auto-associative memory (AAM) and hetero-associative memory (HAM) were proposed [2-6]. These EMs studies have shown, that these models allow the recognition of vectors with  $1024 \div 4096$  components and a significant percentage (up to 25-30%) of damage, at a network power that is 3 to 4 times higher than the number of neurons [3, 5, 6]. For of analysis and recognition should be solved the problem of clustering of objects. This previous clustering allows organizing proper automated grouping data, to cluster analysis, to evaluate on the basis of many signs each cluster, put a class label and improved subsequent learning procedures and classification. At the same time, knowing the significant advantages of EM whencreating on their basis improved neural networks (NNs), multiport AAM and HAM, there was a suggestion aboutthe possibility of modifying EM and MHAM for parallelcluster image analysis [6, 7, 8]. At the same time, an urgent task is to study a more general, spatially invariant(SI) equivalence models (SI EMs) that is more invariantto spatial displacements and the possibilities of its application for image clustering [7-9]. And the latter are basic operations in the most promising paradigms of convolutional neural networks (CNN) with deep learning [8, 9]. In our previous paper [8] questions of new possible ways of self-learning in such advanced models, explaining some important fundamentalconcepts of diverse associative recognition and understand the principles of the functioning of

biological NN-structures, perform modeling of processing processes [10], training and extraction of regularities in such models, and propose their implementation were considered. These questions were considered for bitmaps of multi-level images. In paper [9] we showed that the self-learning concept works with directly multi-level images without processing the bitmaps. In SI EM, we compute the spatially dependent normalized equivalence functions (SD\_NEF) whose elements 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. For implementation ESLCNS [9, 10], we need certain new or modified known devices capable of calculating normalized spatial equivalence functions (NSEqFs) with the necessary speed and performance. Such specialized devices by authors of papers were previously called "image equivalentor". There are known connections of equivalent functions with correlation functions that make it possible to calculate NSEqFs. Thus, the image equivalentor is itself a doubled correlator or a doubled convolver. In paper [8, 9] we showed models for the recognition and clustering of images that combine the process of recognition with the learning process. For all known convolutional neural networks, as for our equivalence models, it is necessary to calculate the convolution of the current fragment of the image in each layer with a large number of templates which are used, selected or formed during the learning process. But, as studies show, large images require a large number of filters to process images, and the size of the filters can also be large. Therefore, the problem of increasing the computing performance of hardware implementations of such CNNs is acute. It should be noted that the accuracy of calculations, especially for large filter sizes and a large dynamic range (8 bits) of halftone images, is required to make the correct decisions when determining neuron-winners. The last decade was marked by the activation of works aimed at the creation of specialized neural accelerators, which compute the function of comparing two 2D arrays and using the operations of multiplication and addition-accumulation. But as our experiments show, our models also allow the construction of ESLCNS. Therefore, in this paper, using our approaches to designing one-dimensional neuron- equivalentors, we consider the structure of the neuron- equivalentor, generalized for processing 2D arrays.

## II. PRESENTATION OF THE MAIN RESEARCH RESULTS

### A. Design of the main unit of ESLCNS

The Fig. 1 shows the block-diagram of the main unit of ESLCNS. The matrix  $X$  forms a certain number of convolutions in the form of matrices  $e$  using a set of defined filters-templates  $W$  which, in our case, are multilevel values, in contrast to the binary ones we used earlier. Thus, we compare each filter with a current fragment in the matrix  $X$ . As a measure of the similarity of the fragment of the matrix  $X$  and the filter the equivalent measures of proximity or other measures such as a histogram can be used. Thus, we compare for each filter similar fragments in the matrix. Fig. 1 shows the new structure of our proposed system, allowing parallel, with a high rate, equal to the speed of selection

from the processed image of its shifted current fragment, to compute a set of stream components (elements) immediately one-cycle all the equivalents convolutions of the current fragment with the corresponding filters. It consists of a micro-display dynamically displaying current fragments, an optical node in the form of a micro-lens array (MLA) with optical lenses (not shown!) and a 2D array of neuron-equivalentors (NEqs) with optical inputs. Each NEq is implemented in a modular hierarchical manner and can consist of similar smaller sub-pixel, also 2D type, base nodes.

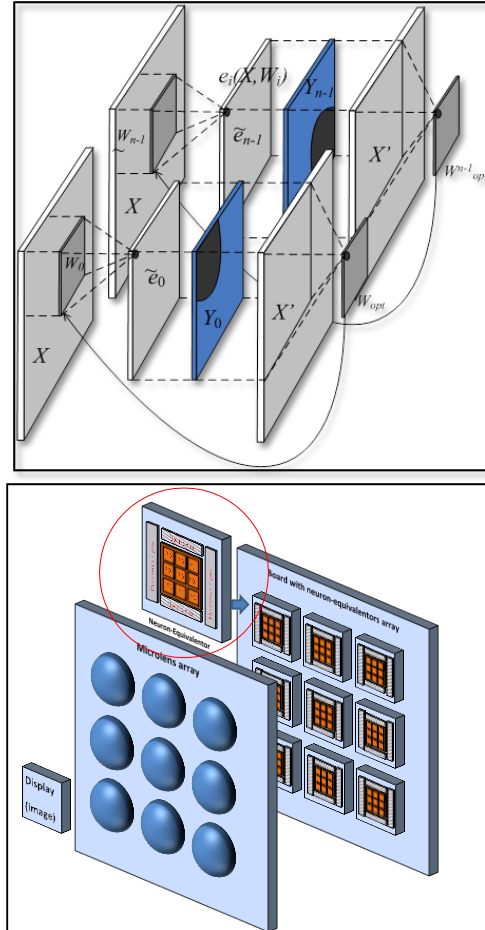


Figure 1. The structure of the basic unit of the ESLCNS (top). The neuron-equivalentors array (bottom).

The NEq has a matrix (ruler) of photo-detectors, on which a halftone image of the fragment is projected through the micro-lens array (MLA), and the number of electrical analog inputs equal to the number (number) of photo-detectors, to which by means of any known method: from the sample and hold device (SHD), from the analog memory, with subsequent conversion using a set of DACs, etc. the filter components are fed. These components are represented in the form of micro-currents. Each NEq has its own filter mask from a set of filters selected or formed by training. Thus, at the inputs of each NEq we have two arrays (vectors) of analog currents representing the compared current fragment and the corresponding filter-standard, and the output of the NEq is an analog current signal, nonlinearly transformed in accordance with the activation function and representing some measure of their similarity, proximity).

B. Design and Modeling of Nodes and Cells of Neuron-Equivalentors as Accelerators

In our case, this measure is a normalized equivalence (eq) and nonequivalence (neq), we can calculate them by averaging the component maxima and minima currents. Therefore, the base node, see

Fig. 2-4, contains N two input counters of maximum and minimum currents and one normalizer on current mirrors, which forms two output signals corresponding to normalized eq and neq from two N-component vectors.

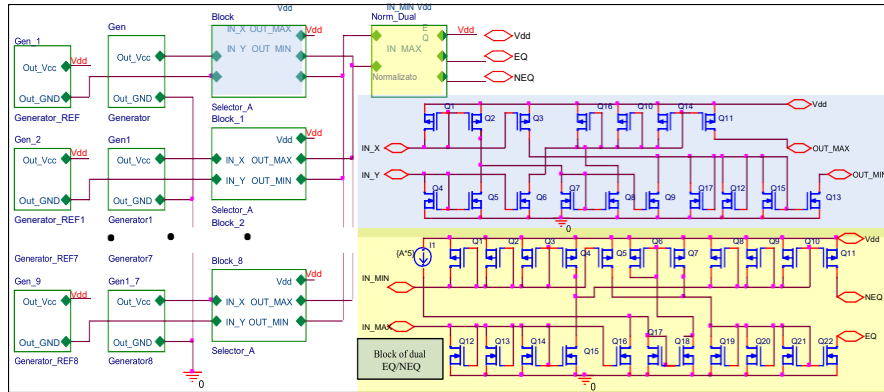


Figure 2. The basic unit for calculating the normalized Eq (NEq) by averaging the component peak and minima of currents on the basis of current mirrors and the schemes of the limited difference.

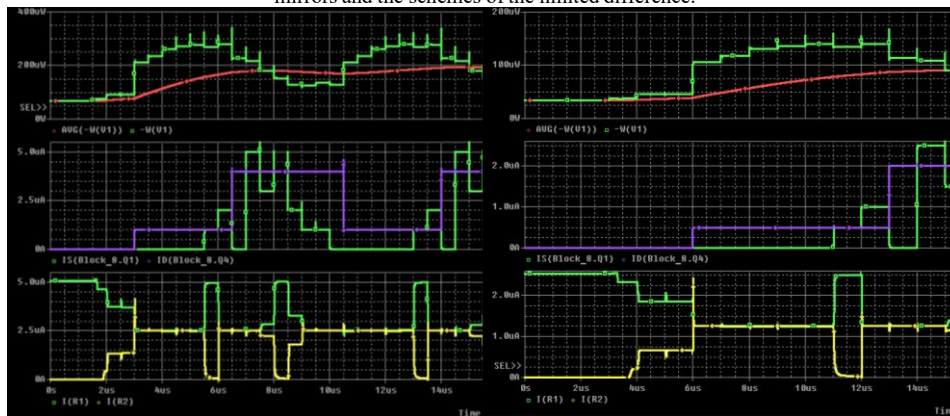


Figure 3. The results of modeling the base unit for the filter size 3x3 (with 9 inputs): on the left for current  $I_{max}=5\mu A$ ,  $T=1\mu s$ ,  $P=200\mu W$ . On the right for current  $I_{max}=2.5\mu A$ ,  $T=1\mu s$ ,  $P=100\mu W$ . Red line shows power consumption, input (green) and reference (lilac) signals are showed on the middle graphs, on the bottom graph normalized eq (green) and neq (yellow) are showed.

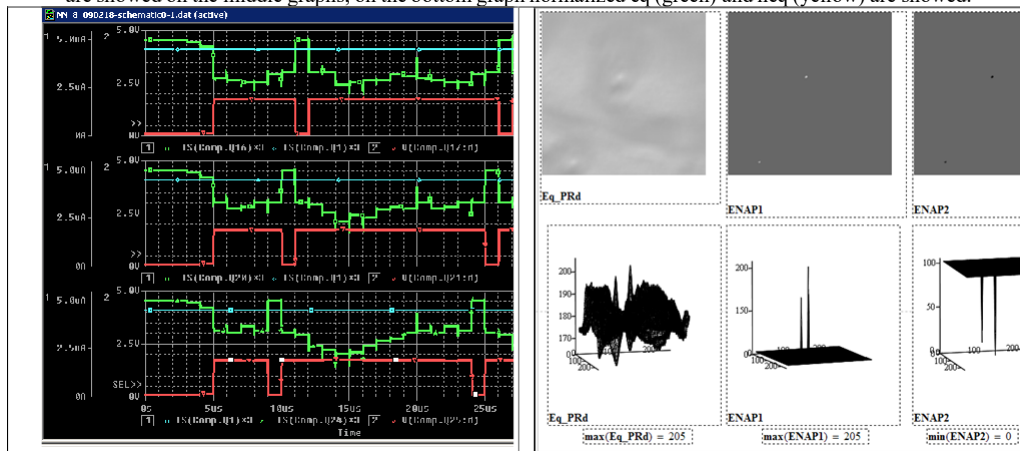


Figure 4. On the left: The result of a network simulation of 8 9-input NEs, a fragment of the successive activity of three neighboring NEs, green - current outputs, blue-additional threshold, red-NE outputs (voltage, potential). On the right: The Mathcad windows on which the module of the program with formulas and results of recognition of fragments on the image are shown, where in 2D and 3D from left to right: the computed NE equivalent, non-linear (after activation) equivalent, linear non-equivalent (part) functions.

The basic unit for calculating the normalized Eq (NEq) by averaging the component peak and minima of currents on the basis of current mirrors and the schemes of the limited difference is shown in Fig. 2. Sources of analog currents are shown as current generators for modeling in OrCAD. The dimension of the input vectors is 9, which corresponds to the filter size 3x3. The results of modeling this nonlinear transformation basic node are shown in Fig. 3 As can be seen from the diagram, the complete coincidence of the input vectors fed to the input of this node and changing over time is evidenced by the changes in the complementary output signals of equivalence and non-equivalence (increasing current to a maximum and a corresponding complementary decrease to a minimum!) at the corresponding moments of time (11 - 12  $\mu$ s and others). The results of modeling the base unit for the filter size 3x3 (with 9 inputs) showed, that processing time is from 1 $\mu$ s to 0.1 $\mu$ s for currents  $I_{max}=5\mu$ A, consumption power is from 200 $\mu$ W to 50 $\mu$ W. In addition to simulating the base node on 9 inputs, we additionally synthesized a neuron-equivalent circuit having 8 such nodes, each of which compares 8 input vectors, resulting in a neural element circuit having 2 vector inputs of 64 dimensions. For a non-linear transformation, we used a node of a circuit, which realizes a piecewise linear approximation of the power-law activation function (auto-equivalence). The simulation results of 64 input NE with nonlinear output conversion showed that such a NE comparing the two 64 component vectors from the current signals provides good time characteristics and has a total power consumption of approximately 2mW, a low supply voltage, contains less than 1000 CMOS transistors with which summation circuits are implemented, limited subtraction and multiplication of analog currents on current mirrors. The simple build-up of nodes and additional introduction of normalizers for equalization and matching of signal levels in micro-nodes allow to increase the number and dimension of inputs and thus increase the dimension of filters. We designed and modeled a neuron-equivalent for two 81-component input vectors, i.e., to implement convolution with a filter of dimension  $9 \times 9$ , by combining nine micro-nodes, namely neuron-equivalentors with two 9-component vector inputs. It has 2 analog input buses. And the results of its modeling are shown in Fig. 4. To verify the functioning of the developed neuron-equivalentors in the network, a neural mini-network of eight 9-input micro-nodes neuron-equivalentors was created, the simulation results of which also confirmed its correct functioning.

### III. DISCUSSION

Within the framework of this work, the set goal was achieved, namely, the principles of implementation of neuron-equivalents as accelerators and their basic cells were developed. The use of analog current reflectors as basic elements for the construction of all nodes, including the node for generating activation functions, neuron-equivalents made it possible to show and experimentally confirm the advantages and prospects of the proposed technical solutions. At the same time, some aspects important for the implementation of the proposed models and their schematic solutions and the further expansion of the spheres of their use remained unexplored. This includes the implementation of

physical models and their testing, measurement of characteristics and indicators for the purpose of their comparative analysis with other concepts.

### IV. CONCLUSIONS

Neuron-equivalentors have a processing-conversion time of 0.1-1 $\mu$ s, low supply voltages of 1.8-3.3V, minor relative computational errors (1-5%), small consumptions of no more than 1-2mW, can operate in low-power modes less than 100 $\mu$ W) and high-speed (10-20 MHz) modes. The efficiency of neuron-equivalentors relative to the energy intensity is estimated at a value of not less than  $10^{12}$  an. op. / sec on W and can be increased by an order of magnitude. The obtained results confirm the correctness of the chosen concept and the possibility of creating hierarchical macro neuron-equivalentors and MIMO structures based on them. They can become the basis for the implementation of CNN and self-learning biologically inspired devices with the number of such neuron-equivalentors equal to 1000, to realize the parallel calculation of equivalent convolutional filters with filter sizes up to  $32 \times 32$ .

### REFERENCES

- [1] 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).
- [2] Krasilenko, V. G., Magas, A. T., "Multiport optical associative memory based on matrix-matrix equivalentors," Proceedings of SPIE Vol. 3055, pp. 137 – 146.
- [3] 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).
- [4] Krasilenko V.G., Nikolskyy, A. I., "The associative 2D-memories based on matrix-tensor equivalental models," *Radioelektronika Inform. Communication*, 2 (8), 45 –54 (2002).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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.
- [10] 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).



# *Applying the Monte Carlo Method for Modeling Order Fulfillment with Consideration of Supply Risk*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.078>

Volodymyr Lytvynenko  
Kherson National Technical University,  
Kherson, Ukraine  
immun56@gmail.com

Andrii Mrykhin  
National University "Odesa Polytechnic"  
Odesa, Ukraine  
amrykhin@gmail.com

Svitlana Antoshuk  
National University "Odesa Polytechnic"  
Odesa, Ukraine  
asgonpu@gmail.com

Nataliya Savina  
National University of Water and Environmental  
Engineering,  
Rivne, Ukrain  
n.b.savina@nuwm.edu.ua

Oleh Marchuk  
National University of Water and Environmental Engineering,  
Rivne, Ukrain  
o.o.marchuk@nuwm.edu.ua

**Abstract** — This paper presents the application of the Monte Carlo method for modelling order fulfilment, taking into account supply risks and delays. The method allows for the consideration of stochastic events and uncertainties in supply chains, which are becoming increasingly complex and vulnerable to various risks, such as production failures, transportation issues, and external factors. Using probabilistic distributions, the Monte Carlo method enables forecasting the frequency and impact of delays, supporting proactive decision-making in logistics management. The developed model assesses the likelihood of on-time order fulfilment under uncertainty, demonstrating the effectiveness of Monte Carlo simulations. The simulation results provide insights into delay patterns, risk factors, and potential strategies for minimizing them, creating opportunities for supply chain optimization.

**Keywords** — Monte Carlo method, modelling, supply chain, supply risks, delays, logistics, resilience, uncertainty, stochastic events, forecasting, optimization.

## **Introduction**

The Monte Carlo method is increasingly pivotal in the simulation of order fulfilment processes, particularly within supply chains characterized by numerous risks and uncertainties. In environments where deliveries may be disrupted by a multitude of factors—ranging from production failures and transportation issues to weather events and political instabilities—traditional planning methods often prove inadequate. In contrast, the Monte Carlo approach enables the modelling of a broad spectrum of scenarios, incorporating the stochastic nature of these disruptions effectively. This method's significance lies in its ability to simulate random events and uncertainty, making it especially relevant for contemporary supply chain

management. For example, delays can be modelled based on established probabilistic distributions, allowing for the forecasting of both the frequency and severity of potential disruptions. A Poisson distribution, for instance, can be utilized to represent the frequency of delays or failures, enabling a probabilistic assessment of such occurrences. In this framework, each event is treated as an independent simulation, and the larger the number of simulations, the greater the precision in the resulting predictions. This approach provides a strategic advantage in contexts where reactive problem-solving is insufficient or impractical. By employing the Monte Carlo method, organizations are better equipped to anticipate potential disruptions and develop preemptive strategies, thereby enhancing resilience and optimizing overall supply chain performance. The flexibility of the Monte Carlo method is evident in its adaptability to diverse conditions. For instance, if lead times are known to follow a normal distribution, this distribution can be directly applied. Alternatively, in cases where the distribution is asymmetric, a beta distribution may be employed instead. This adaptability makes the Monte Carlo method a versatile tool for analyzing a range of logistics challenges, whether forecasting delivery times, assessing risks associated with product spoilage, or evaluating the impact of delays on the entire supply chain. The results of these simulations provide a strong basis for data-driven decision-making. Management can utilize this information to assess the potential impact of supply chain adjustments on overall order fulfilment times, empowering them to implement strategic policy changes, such as adding contingency routes, increasing inventory levels, or partnering with new suppliers. Simulation analysis also allows for proactive identification and mitigation of supply chain vulnerabilities, helping to enhance overall resilience and efficiency. As global supply chains grow more complex, they face heightened exposure to diverse risks—ranging from financial and political disruptions



to environmental and social challenges. This exposure highlights the essential need to incorporate a variety of risk factors and simulate potential scenarios. In this context, the Monte Carlo method is invaluable, enabling the modelling of even rare, high-impact events. By simulating such scenarios, companies can reduce potential losses and build greater resilience into their supply chain, equipping them to respond more effectively to unexpected disruptions. Another significant aspect of the Monte Carlo approach is its application in logistics optimization. When simulations indicate that certain routes may lead to delays, companies can make proactive adjustments to their delivery plans. This not only reduces the costs associated with disruption recovery but also increases the reliability of order fulfilment, an outcome that is particularly valuable for maintaining client satisfaction. Contemporary challenges, including pandemics, climate change, trade conflicts, and other global factors, further underscore the critical importance of Monte Carlo simulations in modern supply chain management. Today's supply chains operate amid unprecedented levels of uncertainty, which conventional planning methods struggle to address comprehensively. The Monte Carlo method, however, enables the modelling of various "what-if" scenarios, providing a robust framework for anticipating a broad spectrum of potential disruptions. Fundamentally, this approach serves as a powerful tool for both risk management and efficiency optimization. By simulating diverse scenarios, the Monte Carlo method enables organizations to evaluate the resilience of their operations under fluctuating conditions, thereby identifying not only risk factors but also opportunities for enhanced efficiency. This capability becomes particularly essential as businesses increasingly pursue flexible, adaptive management strategies, emphasizing a proactive approach to operations rather than merely reactive responses to emerging issues.

The primary contributions of this article are as follows:

1. Application of the Monte Carlo method for simulating order fulfilment under supply chain uncertainties.
2. Incorporation of delay and disruption risks into the forecasting model, enhancing its practical applicability.
3. Development of a mathematical model for estimating the probability of on-time order fulfilment, thereby improving planning accuracy.
4. Analysis of the impact of uncertainty on logistics processes, supporting increased resilience and flexibility within supply chains.

The remainder of this article is organized as follows: Section 2 provides a literature review, emphasizing the importance of risk analysis and the application of the Monte Carlo method for assessing risks in supply chains to mitigate delays. Section 3 formulates the research problem, focused on predicting order fulfilment times considering risks and delays, with a formal approach to calculating the probability of

timely completion. Section 4 describes the Monte Carlo method for modelling probabilistic scenarios and outlines an algorithm covering the key steps, from initialization to the assessment of statistical characteristics. Section 5 presents the simulation results, demonstrating the impact of uncertainty levels on order fulfilment times and delay risks, supported by diagrams and visualizations. The final Section discusses the Monte Carlo method as an effective tool for risk management and enhancing supply chain flexibility, particularly under conditions of global uncertainty.

### 2. Relevant work

These articles explore diverse applications of the Monte Carlo method for risk modelling in order fulfilment, offering insight into how this approach facilitates managing uncertainty and mitigating the effects of delays within supply chain operations. Presented here are examples of studies that employ Monte Carlo simulations to model order fulfilment under supply risk conditions. Paper [1] introduces a model for evaluating the impact of tactical procurement risks on order fulfilment in make-to-order production, with a specific focus on risks like delays, price volatility, and quality fluctuations that critically influence timely order completion. In Paper [2], a comprehensive review is conducted on supply chain risk management, emphasizing the role of Monte Carlo simulations in quantifying risks from delivery delays and logistical disruptions. The authors underscore the necessity of quantitative risk assessments in devising effective mitigation strategies. Paper [3] elaborates on the combined use of Monte Carlo and discrete-event simulations to quantitatively assess supply chain disruption risks, proposing a model for analyzing the effects of different types of risks, including delays and operational interruptions, on order fulfilment. Paper [4] examines supplier selection methodologies with a focus on resilience to disruptions, employing Monte Carlo simulations to quantify risk exposure and predict delay probabilities under various disruption scenarios. Paper [5] addresses strategies to mitigate supply chain disruption risks, utilizing Monte Carlo simulations to assess delay probabilities while highlighting practical approaches to risk management and minimizing impacts on business operations. In the paper [6], the authors present a conceptual and analytical framework for supply chain risk management, with a detailed exploration of how Monte Carlo simulations are applied to calculate the likelihood of failures and delays and to evaluate their effects on logistical processes. Paper [7] outlines a systems-based approach to risk modelling in supply chains using Monte Carlo simulations, examining the impact of various uncertainty sources, such as delays and breakdowns, on the efficiency of order fulfilment and supply chain resilience. Paper [8] discusses dynamic recovery strategy development for supply chains susceptible to cascading disruptions, using Monte Carlo modelling to simulate recovery scenarios and evaluate order fulfilment timelines under delay risks. Finally, the paper [10] provides a critical review of methodologies for designing resilient supply chains and value networks, incorporating Monte Carlo

simulations to assess and optimize order fulfilment processes amid supply uncertainty.

The objective of this study is to develop and apply the Monte Carlo method for modelling order fulfilment processes undersupply and delay risk conditions. This involves constructing a mathematical framework capable of predicting the likelihood of on-time order fulfilment amid uncertainty and examining the influence of multiple risk factors on logistics. This approach aims to strengthen supply chain resilience and adaptability, providing robust support for decision-making under uncertainty.

### 3. Problem Statement

The task of applying the Monte Carlo method for simulating order fulfilment while accounting for supply risks and delays is formulated as follows: Given a set of orders  $N$ , the goal is to determine the probability of each order being completed within specified deadlines.  $T_i$ . The order completion time  $D_i$  has a distribution  $f(D_i)$ , that incorporates uncertainties. Additionally, delay risks.  $P_j$  And delay time distributions.  $L_j$  Are introduced, which are associated with various types of failures. The simulation involves repeatedly generating random variables representing.  $D_i$  and  $L_{ij}$ , where  $L_{ij}$  Is the delay caused by the  $j$ -th risk for order  $i$ . The total completion time of an order in each iteration of the simulation is  $D_i + \sum_j L_{ij}$ , where the probability of  $L_{ij}$  Occurring is determined by parameters.  $P_j$ . After performing a large number of iterations  $K$ , the distribution of total completion times is assessed, along with the probability that it does not exceed  $T_i$ . Based on the statistical data obtained during the simulation, metrics are calculated, such as the probability of on-time completion.  $P_{execution}(T_i)$ , the mean completion time, and measures of variability.

## 4. Materials and methods

### 4.1 Monte Carlo method

The Monte Carlo method was first proposed in the 1940s by physicists Stanislaw Ulam and John von Neumann. The name "Monte Carlo method" was introduced because it was associated with the gambling activities at the Monte Carlo casino, reflecting the use of random (stochastic) processes in the method. The first systematic description and application of the Monte Carlo method were presented in the work [10]. The Monte Carlo algorithm involves using random simulation to numerically solve various problems involving uncertainties and probabilistic processes. In this context, it is used to estimate event probabilities or statistical characteristics of complex systems. The algorithm includes several key steps, which can be detailed as follows:

#### Step 1: Initialization

**Setting the initial state of the system.** The initial state of the system is determined  $X(0)$ , including the values of all state variables (e.g., initial resource stocks). This can be a single vector of values or a set of initial conditions considering different possible initial situations.

#### Definition of distributions of random variables.

Defines probability distributions for all random variables involved in the model, such as resource supply  $Q_i(t)$  and demand  $D_i(t)$ . These can be normal, lognormal, Poisson or any other distributions reflecting the nature of stochastic processes in the system.

**Determination of time parameters.** The time step is set  $\Delta t$  and the total number of modeling steps  $N_t$ , to set the duration of the simulation  $T = N_t \Delta t$ .

**Step 2: Trajectory generation.** For each simulated scenario, time-step iteration is performed to simulate the evolution of the system state. This process can be detailed as follows:

**Trajectory Initialization.** Starts from the specified initial state  $X(0)$ .

1. **Time iteration.** Для каждого временного шага  $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, T$ :

- **Generation of random variables.** Random values are generated for all quantities such as  $Q_i(t)$  and  $D_i(t)$ , using the given probability distributions.

- **Solving the dynamic model.** The system status is updated  $X(t)$  According to a dynamic model described by a system of stochastic differential equations (SDE):

$$(t) = f(X(t), t)dt + G(X(t), t)dW(t) \quad (1)$$

Or, in discrete form:

$$X_{t+\Delta t} = X_t + f(X_t, t)\Delta t + G(X_t, t)\Delta W \quad (2)$$

where  $f(X_t, t)$  describes the deterministic evolution of the system, and  $G(X_t, t)\Delta W_t$  There's a stochastic component.

**2. Trajectory Recording.** The values obtained are stored  $X(t)$  for each time step to fully describe the trajectory of the system state.

#### Step 3: Repeat trajectory generation.

The trajectory generation process from Step 2 is repeated many times (e.g.,  $N$  times) to construct a statistically significant sample of possible system evolutions. Each trajectory represents one possible realization of the system evolution taking into account random perturbations.

**Step 4: Estimation of probabilities or statistical characteristics.**

**Defining the target event.** A criterion is specified for the event whose probability is to be estimated. For example, event  $A$  may represent a situation where the stocks of all resources remain above zero throughout the simulation period:

$$A = \{X_i(t) > 0, \forall i, \forall t \in [0, T] \quad (3)$$

**Counting successful realizations.** The number of trajectories is determined.  $N_A$ , for which the event  $A$  occurred, i.e. the conditions of the task were fulfilled.

**Calculating the probability of an event.** The probability of the target event is estimated using the formula:

$$P(A) \approx \frac{N_A}{N}, \quad (4)$$

where  $N_A$  is the number of trajectories that satisfy the criterion, a  $N$  is the total number of generated trajectories.

### Step 5: Estimation of statistical indicators

If it is required to estimate not only the probability of an event, but also other characteristics (e.g., mean, variance), the corresponding indicator is calculated for each trajectory, and a statistical characteristic is calculated from the results of all trajectories. For example, the mean value  $\hat{\mu}$  and dispersion  $\hat{\sigma}^2$  are estimated according to the formulas:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{\mu})^2, \quad (6)$$

where  $X_i$  is the result of the  $i$ th trajectory.

Thus, the Monte Carlo method can be used to numerically solve problems related to uncertainties and random processes, allowing us to estimate probabilities of complex events and calculate statistical characteristics. Its application is also appropriate for logistic activities.

### 4.2 Modeling of order fulfillment

To mathematically describe the steps of the algorithm aimed at modelling possible delivery delays using the Monte Carlo method, we present the main steps:

#### 1. Problem statement and initial data

The task of modelling delivery delays is defined as a random process depending on the probability of delays and delivery lead time. Input data include:

**Lots of orders**  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ , where every order  $o_i$  characterized by:

Expected lead time  $T_i$ ,

Probability of delay  $R_i$ .

**Multiple deliveries**  $S = \{s_1, s_2, \dots\}$ , where for each delivery  $s_j$  delay probability is set  $P_j$  and the length of the delay  $D_j$ .

#### 2. Delay modelling by Monte Carlo method

At each modeling stage for each order  $o_i$  one of the possible delay scenarios is selected. For this purpose, a sample of delays is created, where:

**The delay scenario** is sampled according to the law of probability distribution  $\{P_j\}$  per shipment  $s_j$ :

$$\Delta T_i = \begin{cases} D_j, & \text{with a probability } P_j \\ 0, & \text{with a probability } 1 - P_j \end{cases} \quad (7)$$

Here  $\Delta T_i$  denotes a random delay value for the order  $o_i$  in the event of a delay event.

**Updated delivery time**  $T_i'$  for ordering  $o_i$  on account of the delay  $\Delta T_i$  is calculated as:

$$T_i' = T_i + \Delta T_i. \quad (8)$$

This value represents the order fulfillment time including possible delays.

### 3. Estimation of entropy as an indicator of uncertainty

For an order with multiple possible outcomes (e.g., on-time delivery or delays of different durations), entropy can be calculated for the total uncertainty estimate based on the probability distribution of different delay scenarios. Formally, if  $X$  is a random variable denoting the fulfilment status of an order with  $n$  possible outcomes, then the entropy  $H(X)$  is defined as:

$$H(X) = - \sum_k p(x_i)_k \log(p(x_i)) \quad (9)$$

where  $p(x_i)$  there is a probability of delay for each scenario  $x_i$  in a sample of possible outcomes. This indicator is a metric of randomness and allows quantifying the impact of uncertainty on the expected lead time.

### Calculation of metrics to analyze results

Statistical measures such as average latency are calculated to evaluate the performance of the models and analyze the data:

$$\text{Average delay} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{fact}^{(i)} - T_{plan}^{(i)}) \quad (10)$$

Where:  $N$  is the total number of orders;  $T_{fact}^{(i)}$  is the actual execution time of order  $i$ ;  $T_{plan}^{(i)}$  is the planned time of fulfilment of order  $i$ .

Deviations and standard errors can also be accounted for to analyze in detail the probability distribution of lead times, allowing the impact of delays on operational processes and supply chain resilience to be assessed.

### Analysis and interpretation of results

The simulation results are analyzed to identify delay patterns and examine their distribution. Using visualizations of order fulfilment time distributions and entropy metrics, risks and their potential impact on fulfilment times can be assessed.

Thus, the proposed approach, based on the Monte Carlo method, enables the modelling of probabilistic delay scenarios in the supply chain by using uncertainty

metrics to quantify risk. This method allows for the exploration of delay distributions and supports informed management decisions to minimize negative impacts on the supply chain.

Algorithm 1: Monte Carlo Simulation for Delivery Delay Modeling

```

Input: order_data, supplies_data, iterations = 1000
Output: Array of total delays for each iteration
Initialize delays array to store results for each iteration;
Set current_risk ← order_data.supply_risk[1];
Set current_delivery_time ← order_data.delivery_time[1];
while i ≤ iterations do
  Set base_delay ← 0;
  if runif(1) < current_risk then
    | Set base_delay ← rpois(1, lambda = 3);
  end
  Initialize supplier_delays array;
  for each supplier j in supplies_data do
    | if runif(1) < supplies_data[j].delay_probability then
      | Append supplies_data[j].delay_days to supplier_delays;
    end
  end
  Calculate total_delay ← base_delay + sum(supplier_delays);
  Append total_delay to delays;
  Increment i;
end
return delays;

```

Explanation of Key Steps

1. **Initialization:** Sets up the delay array and retrieves the current supply risk and delivery time.
2. **Iteration with while...do:** Repeats the delay calculations for a set number of iterations.
3. **Conditional Delay Calculation:** Uses random values to determine if base and supplier delays occur.
4. **Aggregation:** Combines base and supplier delays to produce a total delay for each iteration.

This pseudocode provides a formal outline of the algorithm for simulating delivery delays with Monte Carlo methods, using structured logic and probability checks.

5. EXPERIMENT AND RESULTS

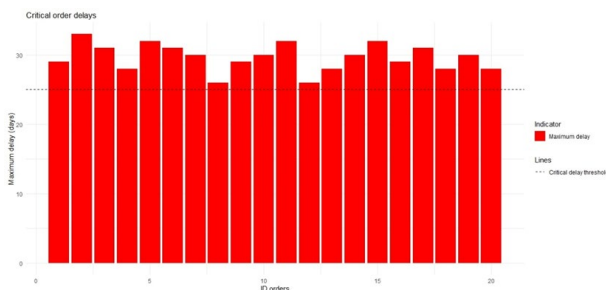


Fig.1 Visualization of critical order delays – 25 days (X-axis shows order number)

The chart provides a detailed illustration of critical order delays, with each order ID displayed on the x-axis and the corresponding maximum delay duration (in days) on the y-axis. Each bar represents the peak delay recorded for a particular order, highlighted in red to denote critical delays. A dashed horizontal line indicates an arbitrary "Critical Delay Threshold" (set at 10 days for this analysis), functioning as a benchmark to identify orders that surpass an acceptable delay limit. Any bar that exceeds this threshold denotes an order with a delay surpassing the critical level, which may

signal potential operational disruptions, decreased customer satisfaction, or increased costs.

Upon examining the chart, it becomes evident that all orders experience delays significantly beyond the critical threshold. This observation suggests persistent and substantial issues within the supply chain or logistics processes. Potential underlying causes may include unreliable supplier performance, logistical bottlenecks, or inefficiencies in order handling and processing. To address these concerns, a deeper investigation into the root causes of these delays is recommended, followed by the development of targeted strategies to mitigate their impact and enhance supply chain resilience.

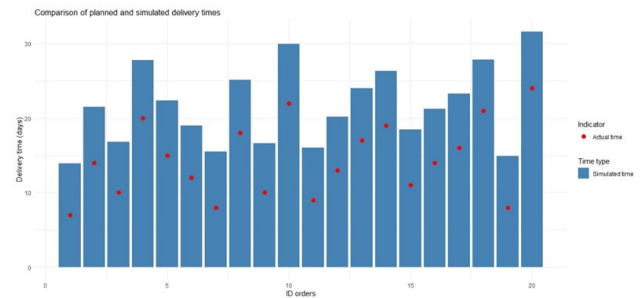


Fig. 2 Visualization of Planned vs. Simulated Delivery Times Comparison

The chart presents a comparison of planned and simulated delivery times across various orders, facilitating a deeper analysis of the predictive accuracy and practical applicability of the forecasting model in supply chain management. The x-axis displays order identifiers, while the y-axis represents delivery time in days, enabling a quantitative assessment of the temporal deviations between planned and simulated values. Red dots, representing the actual (or expected) delivery times, are overlaid on blue bars that depict the simulation results for each order. The visual distance between the position of these dots and the height of the bars allows for an immediate evaluation of how closely the model simulates delivery times. When the red dots align with or are very close to the top edge of the blue bars, a high level of predictive accuracy can be inferred. Such alignment suggests that the model effectively captures the key parameters and factors influencing delivery, indicating its potential applicability for planning purposes. Conversely, where red dots deviate significantly from the bar edges—especially when the simulated times either overestimate or underestimate actual times—discrepancies arise, signalling potential model deficiencies or incomplete input data. These differences highlight the need for further investigation: what caused these deviations? Potential explanations include unanticipated delays, unmodeled logistical factors unique to certain orders or delivery contexts, or limitations within the simulation model itself, such as inadequate handling of stochastic variables. This chart serves both a visual and analytical function, providing a clear indication of where the model requires refinement or recalibration. If certain orders consistently exhibit large discrepancies between simulated and actual delivery times, this may indicate systemic causes, suggesting that model adjustments are necessary.



Conversely, significant alignment across most data points indicates high model validity for the given dataset. In both academic and practical contexts, this approach allows for more than just average-level model evaluation; it enables a critical examination of its accuracy on a case-by-case basis, which is especially valuable for achieving adaptive and predictive management in supply chains.

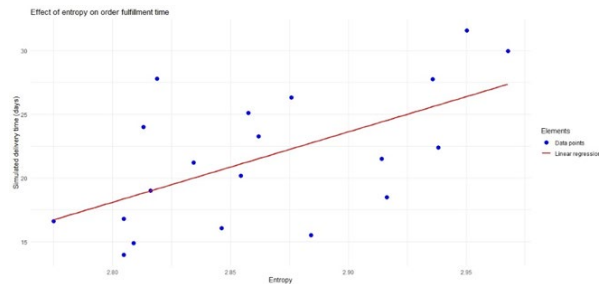


Fig. 3 Effect of entropy on order Fulfillment time

This chart presents a detailed examination of the relationship between entropy levels and simulated order execution times, intending to evaluate how randomness or unpredictability within a system impacts delivery timelines. The X-axis, representing entropy, likely serves as an indicator of the degree of uncertainty or complexity embedded in the order execution process. Higher entropy values typically reflect increased unpredictability, which theoretically correlates with a higher degree of procedural complexity. The Y-axis denotes the simulated delivery times in days, providing a quantitative measure of order completion time under varying conditions of system entropy.

The red regression lines suggest a positive association between entropy and order execution times, highlighting a trend where greater unpredictability in the system correlates with extended average delivery times. This observation can have meaningful implications for logistics management and decision-making processes, suggesting that highly complex or stochastic processes may inherently demand longer durations for completion. Notably, the dispersion of data points (blue markers) around the regression line illustrates considerable variance, indicating that while there is an observable trend, the dependency is not strictly linear. This variability implies that entropy, while influential, is likely not the sole determinant of order execution time. Other factors, potentially structural or external, may significantly contribute to variations in delivery timelines. From an academic perspective, this chart underscores the potential necessity for more sophisticated models to account for additional variables and interactions within the order execution process.

In sum, while the observed correlation offers valuable insights, it warrants further investigation to validate its reliability and applicability. A deeper analysis incorporating additional parameters may enhance the accuracy of predictions, thus advancing the understanding of factors influencing logistical efficiency and system responsiveness.

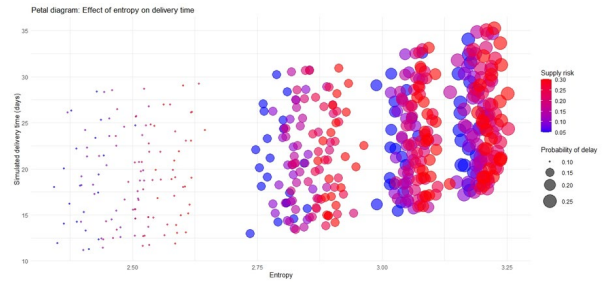


Fig.4 Relationship between supply chain entropy, delivery delay time, delivery risk and delay probability

The presented petal chart illustrates the complex interrelationships between supply system entropy (risk), delivery delay time, supply risk, and delay probability. This diagram visualizes the influence of entropy levels on delivery time, factoring in supply risk and delay probability, allowing for an analysis of how these variables interact to create a multi-layered picture of delivery parameter dependency on system randomness or uncertainty, symbolized by entropy. Entropy, represented on the X-axis, can be viewed as an indicator of logistical system complexity or unpredictability, suggesting high uncertainty and an increased likelihood that delivery times and reliability may deviate from expected parameters. The higher the entropy value, the greater the system uncertainty, which, in turn, creates conditions for various disruptions in the logistics chain that could lead to longer delivery times (displayed on the Y-axis), especially under high-risk and delay-probability conditions.

A close examination of specific data points reveals clustering at certain entropy levels. For instance, at lower entropy levels, delivery times remain relatively stable, not exceeding 25-27 days. However, with increased entropy, data dispersion is observed, indicating a broader distribution of delivery times. This reflects the heightened variability of the system—higher entropy makes delivery less predictable, and order fulfilment time can vary significantly, often exceeding 30 days. Colour coding in the diagram illustrates the level of supply risk: from blue and purple for low risk to bright red for high risk. Thus, at low entropy levels, blue and purple points dominate, symbolizing relatively low risk. However, with higher entropy values, the number of red points sharply increases, highlighting a direct relationship between uncertainty and risk. This suggests that complex and unstable systems are more often exposed to high supply risks, a key factor in delays. Additionally, the point size on the chart reflects delay probability, with larger points indicating higher delay probability, clustering in areas with high entropy and high risk. This suggests that delay probability rises as both risk and entropy increase. Highly chaotic and uncertain systems likely face not only greater challenges in supply control but also an increased tendency for disruptions, resulting in delays.

In sum, the diagram reveals a complex and nonlinear relationship between entropy level, supply risk, delay probability, and delivery time. Rising entropy leads to increases in both risk and delay probability, ultimately affecting delivery time. This



insight emphasizes the importance of managing uncertainty in logistics, as even a small increase in entropy can lead to a significant decline in delivery reliability and increased time costs.

### 6. Conclusion

The research findings presented in the article allow for more comprehensive conclusions regarding the application of the Monte Carlo method for modelling order fulfilment while considering risks and uncertainties in supply chains:

1. The Monte Carlo method has confirmed its capability to model complex supply chains that are subject to significant risks. In a globalized environment, where supply chains often depend on multiple factors (including logistics, politics, climate conditions, and production disruptions), this method enables the consideration of various scenarios that reflect real uncertainty. Thus, it becomes indispensable for companies operating in unstable and dynamic markets.

2. The study demonstrates that accounting for the risks of delays and supply disruptions allows for a more accurate prediction of potential disruptions in the supply chain and their impact on order fulfilment timelines. Risk-aware modelling methods not only identify potential weak points but also forecast the likelihood of delays. Consequently, company executives can proactively develop strategic measures to prevent potential losses—such as ensuring backup routes or increasing inventory levels, thereby enhancing supply reliability.

3. The use of various probability distributions within the Monte Carlo method allows for the consideration of the specifics of particular risks and delays. For example, a normal distribution may describe more predictable risks, while beta or Poisson distributions can be employed for rarer but significant events. This flexibility renders the model universal and more precise, as it enables adaptations to the conditions of specific supply chains, which is particularly important when assessing rare and catastrophic events.

4. The Monte Carlo method, as part of the proposed model, facilitates more informed managerial decision-making. Through this approach, companies can not only anticipate how various risks will impact order fulfilment timelines but also take preemptive measures. Executives can utilize simulation results to optimize logistics—revising routes, increasing stock levels, or establishing agreements with alternative suppliers. This enhances supply chain resilience and minimizes potential financial losses in the face of global and regional crises.

5. The application of the Monte Carlo method as a tool for risk and uncertainty analysis strengthens the resilience of logistics systems. The article notes that this method can model even extremely rare events that, nonetheless, may have significant impacts on business. This capability allows companies to prepare in advance

for potential crises, including climate disasters, epidemics, and political conflicts, making their logistics processes more flexible and adaptable to external threats.

6. In light of the rising global risks (such as pandemics, climate change, and trade wars), the article emphasizes the importance of a proactive approach to logistics management facilitated by the Monte Carlo method. It assists companies in planning their logistics processes ahead of time, minimizing reactive decisions that may be less efficient and more costly. This provides businesses with an advantage in rapidly changing market conditions, allowing them to better manage risks and adapt to new challenges.

Thus, this study substantiates the application of the Monte Carlo method as a tool for enhancing the reliability of supply chains for logistics companies. The use of this method not only mitigates the impact of delays and disruptions on order fulfilment but also fosters a more resilient and adaptive logistics strategy, which is especially relevant in the context of global instability and increasing uncertainties.

### References

- [1] [1] Mrykhin, A. L., & Antoshchuk, S. G. . An information model for assessing the impact of tactical risks of purchasing materials on the fulfilment of orders in the production to order./ Herald of Modern Information Technologies, (2024)7(3), 243-252. <https://doi.org/10.15276/hait.07.2024.16>
- [2] [2] Tang, O., & Musa, S. N. (2011). "Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management." International Journal of Production Economics, 133(1), 25-34. DOI: 10.1016/j.ijpe.2010.06.013
- [3] [3] Schmitt, A. J., & Singh, M. (2012). "Quantifying supply chain disruption risk using Monte Carlo and discrete-event simulation." Simulation, 88(9), 1085-1098. DOI: 10.1177/0037549711435053
- [4] [4] Hosseini, S., & Barker, K. (2016). "A Bayesian network model for resilience-based supplier selection in the presence of disruptions." International Journal of Production Economics, 180, 68-87. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.07.007
- [5] [5] Chopra, S., & Sodhi, M. S. (2014). "Reducing the risk of supply chain disruptions." MIT Sloan Management Review, 55(3), 73-80. DOI: 10.2139/ssm.2371820
- [6] [6] Gaonkar, R., & Viswanadham, N. (2004). "A conceptual and analytical framework for the management of risk in supply chains." IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 1(1), 97-107. DOI: 10.1109/TASE.2004.824851
- [7] [7] Ghadge, A., Dani, S., Chester, M., & Kalawsky, R. (2013). "A systems approach for modelling supply chain risks." Supply Chain Management: An International Journal, 18(5), 523-538. DOI: 10.1108/SCM-11-2012-0366
- [8] [8] Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Ivanova, M., & Werner, F. (2016). "Dynamic recovery policies for time-critical supply chains under conditions of ripple effect." International Journal of Production Research, 54(8), 2374-2387. DOI: 10.1080/00207543.2015.1112047
- [9] [9] Klibi, W., Martel, A., & Guitouni, A. (2010). "The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review." European Journal of Operational Research, 203(2), 283-293. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.06.011
- [10] [10] Metropolis, N., & Ulam, S. (1949). The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, 44(247), 335-341. doi: 10.1080/01621459.1949.10483310

# Computer modeling of water purification in bioplateau taking into account biodegradation processes and greenhouse gas emissions

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.079>

Petro Martyniuk

National University of Water and Environmental Engineering  
Rivne, Ukraine  
[p.m.martyniuk@nuwm.edu.ua](mailto:p.m.martyniuk@nuwm.edu.ua)

Natalia Ivanchuk

National University of Water and Environmental Engineering  
Rivne, Ukraine  
[n.v.medvid@nuwm.edu.ua](mailto:n.v.medvid@nuwm.edu.ua)

Liubov Shostak

National University of Water and Environmental Engineering  
Rivne, Ukraine  
[l.v.shostak@nuwm.edu.ua](mailto:l.v.shostak@nuwm.edu.ua)

Kostyantyn Shayniuk

National University of Water and Environmental Engineering  
Rivne, Ukraine  
[k.s.shainiuk@nuwm.edu.ua](mailto:k.s.shainiuk@nuwm.edu.ua)

**Abstract** – The authors’ research concerns the equations of filtration of contaminated water with dispersed particles of organic residues. A review of works, formulation of research tasks and a mathematical model of filtration with consideration of clogging and suffusion processes and biodegradation are carried out. Dependencies for estimating the volume of greenhouse gases released as a result of biodegradation of organic pollution are proposed (Abstract)

**Keywords** – filtration; bioplateau; biodegradation; emission; greenhouse gases (key words)

## I. INTRODUCTION

Bioplateau is one of the energy-saving methods of water treatment [1]. Let’s assume that contaminated water enters the bioplateau along with dispersed particles of organic residues. As a result, they (the particles) clog the pore space of the filter bed, but also undergo biodegradation processes [2, 3]. Biodegradation results in the generation of greenhouse gases (mainly carbon dioxide and methane) [4] and their emission into the atmosphere. Greenhouse gas emissions also occur during the formation of humus [5], as a result of the transformation of organic residues in the soil.

Works [6, 7] investigated the processes of water purification under conditions of variable backfill porosity using mathematical and computer modeling methods. In particular, it is shown that clogging, when taken into account in predictive models, can reduce the efficiency and productivity of the bioplateau by 25% during the year. However, the biodegradation processes in case of contamination with organic particles were not taken into account. This is the purpose and novelty of this research.

## II. MATHEMATICAL MODEL OF FILTRATION WITH CONSIDERATION OF CLOGGING-SUFFUSION AND BIODEGRADATION PROCESSES

Thus, the mathematical model of filtration, taking into account clogging and suffusion processes and biodegradation processes, will contain the following equations:

$$\nabla \cdot (\rho_p(c)k_h(c, s, \sigma)\nabla h) = \sigma \frac{\partial \rho_p}{\partial c} \cdot \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\rho_p}{\rho_s} \frac{\partial s}{\partial t}, X \in \Omega, (1)$$

$$\sigma \left( 1 - \frac{c}{\rho_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial c} \right) \frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_c \nabla c) - \left( u \left( 1 - \frac{c}{\rho_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial c} \right) - w \right) \nabla c - \frac{\partial s}{\partial t}, X \in \Omega, (2)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \alpha \cdot c - \beta \cdot s - k_f s(X, t), X \in \Omega, (3)$$

$$u = -k_h(c, s, \sigma)\nabla h, X \in \Omega, (4)$$

Here  $\sigma(X, t) = \sigma_0(X) - \frac{s(X, t)}{\rho_s}$  is the backfill porosity, which is variable in time due to changes in the concentration of clogging particles;  $\sigma_0(X)$  is the porosity of the backfill “skeleton” in the complete absence of clogging particles;  $s(X, t)$  is the mass concentration of clogging particles (mass of particles associated with the backfill skeleton and referred to a unit volume of the porous medium);  $c$  is the concentration of the suspension to be filtered (mass of suspended particles per unit volume of pore fluid);  $\rho_s$  is the density of the clogging particles;  $k_h = k_h(c, s, \sigma)$  is the filtration coefficient, which depends on the suspension concentration and porosity;  $h$  is the pressure in the pore fluid;  $D_c$  is the coefficient of particle dispersion in the pore

suspension;  $u = -k_h(c, s, \sigma) \text{div } h$  is the filtration rate of the pore suspension;  $w$  is the settling rate of solid particles of the suspension;  $\alpha$  is the coefficient of particle adhesion rate;  $\beta$  is the coefficient of particle detachment rate;  $k_f$  is the coefficient of biodegradation of organic particles.

The third term « $-k_f s(X, t)$ » in the right side (3) represents biodegradation processes according to the simplest biodegradation model [1]

$$s(X, t) = s^{(0)} \exp(-k_f t).$$

Then we have

$$\frac{\partial s(X, t)}{\partial t} = -k_f s^{(0)} \exp(-k_f t)$$

or

$$\frac{\partial s(X, t)}{\partial t} = -k_f s(X, t). \quad (5)$$

The intensity of greenhouse gas emissions, according to [8], is determined from the following dependence

$$\frac{\partial V(X, t)}{\partial t} = k_f s(X, t) L_0 \exp(-k_f t).$$

Here  $V(X, t)$  is the volume of methane released per unit volume of porous backfill medium,  $L_0$  is the total methane generation potential. Then, taking into account (5), we have

$$\frac{\partial V(X, t)}{\partial t} = -\frac{\partial s(X, t)}{\partial t} L_0 \exp(-k_f t).$$

The above formula pertains to  $X \in \Omega$ . If we consider  $G(t)$  as the total volume of methane emitted over time  $t \geq 0$ , then

$$\frac{dG(t)}{dt} = -L_0 \int_{\Omega} \frac{\partial s(X, t)}{\partial t} \exp(-k_f t) dX.$$

### III. NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM AND GENERAL CONCLUSIONS

Numerical solutions of the corresponding boundary value problem were found by the finite element method using FreeFem++ package [9]. One of the important input parameters is the biodegradation coefficient, which, for example, according to [3] for food waste

$$k_f = 0.00192 \frac{1}{\text{day}}.$$

Numerical experiments were conducted and analyzed. The preliminary results show the influence of biodegradation processes on the change in the porosity of the filter bed and, consequently, on the performance of the bioplateau filter. Numerical experiments also show the possibility of significant greenhouse gas emissions in case of high water contamination with food dispersed waste.

Notes. In the above research, the proposal to take into account biodegradation processes in the mathematical model of water treatment in bioplateau, to determine greenhouse gas

emissions, and to formulate algorithms for numerical solution belongs Shostak L. V. Ivanchuk N. V. and Shayniuk K. S. participated in the software implementation of the finite element solution of the corresponding boundary value problem. Martyniuk P. M. provided general scientific advice on the work and consultations on the preparation of the text of the abstract.

### REFERENCES

- [1] Sampriti Katakai, Soumya Chatterjee, Mohan G. Vairale, Sanjai K. Dwivedi, Dharmendra K. Gupta, "Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate)," *Journal of Environmental Management*, volume 283, 2021, pp. 111986.
- [2] Duo Xu, Huimin Sun, Jun Wang, Nong Wang, Yajie Zuo, Ahmed Ali Mosa, Xianqiang Yin, "Global trends and current advances regarding greenhouse gases in constructed wetlands: A bibliometric-based quantitative review over the last 40 years," *Ecological Engineering*, vol. 193, 2023, pp. 107018.
- [3] Yuekai Xie, Jianfeng Xue, Alistair Deane, "Numerical modelling of settlement of municipal solid waste in landfills coupled with effects of biodegradation," *Waste Management*, vol. 163, 2023, pp. 208 – 221.
- [4] I. Soho, M. Ritzkowski, M. Sultan, M. Farooq, K. Kuchta, "Conceptualization of Bioreactor Landfill Approach for Sustainable Waste Management in Karachi, Pakistan," *Sustainability*, vol. 14(6), 2022, pp. 1 – 22.
- [5] O. Stepanchenko, L. Shostak, V. Moshynskyi, O. Kozhushko, P. Martyniuk, "Simulating Soil Organic Carbon Turnover with a Layered Model and Improved Moisture and Temperature Impacts," *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making*, vol. 149, 2023, pp. 74 – 91.
- [6] V. Moshynskyi, V. Filipchuk, N. Ivanchuk, P. Martyniuk, "Computer modeling of water cleaning in wetland taking into account of suffosion and colmatation," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1/10 (91), 2018, pp. 38 – 43.
- [7] Н. В. Іванчук, П. М. Мартинюк, М. Т. Кузло, "Математичне моделювання фільтраційних процесів в ґрунтових середовищах з урахуванням впливу елементів інженерних споруд [Електронне видання]," Рівне : НУВГП, 2021.
- [8] A. Rafey, F. Z. Siddiqui, "Modelling and simulation of landfill methane model," *Clean Energy Systems*, volume 5, 2023, pp. 100076.
- [9] V. A. Herus, N. V. Ivanchuk, P. M. Martyniuk, "A System Approach to Mathematical and Computer Modeling of Geomigration Processes Using Freefem++ and Parallelization of Computations," *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 54, 2018, pp. 284 – 294.

# Ensuring Straight-Line Motion of the Hexacopter in Case of One Engine Failure

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.080>

Gulush Nabadova

Baku Engineering University,  
Department of Informatics and computer technologies  
Institute of control systems  
Laboratory of modeling and control of continuous  
processes  
Baku, Azerbaijan  
nabadova.g@gmail.com

Sabziev Elkhan,

Institute of control systems,  
Laboratory of modeling and control of continuous  
processes  
Military Scientific Research Institute of National  
Defense University  
Baku, Azerbaijan  
elkhan.sabziev@gmail.com

**Abstract** – It has been observed that the number of accidents due to technical malfunctions in the engines of drone-type unmanned aerial vehicles during mass production has risen significantly. When one of the aircraft's engines fails, the remaining engines must compensate to maintain the mission. This research focuses on the challenges of controlling hexacopter-type unmanned aerial vehicles with six engines in the event of a single engine failure. The paper outlines the mathematical principles for managing the hexacopter's engines so that it can continue operating as it did before the malfunction. The findings indicate that the limited power of the remaining engines may not be enough to sustain the mission without adjustments.

**Keywords** – unmanned aerial vehicle, hexacopter, faulty engine, straight trajectory, control

## I. INTRODUCTION

The rapid development of microelectronics has recently spurred the creation of various types of unmanned aerial vehicles (UAVs). Depending on the characteristics of the tasks they perform and the operational requirements, these UAVs are equipped with different devices (such as photo-video cameras, brackets for suspending loads, relays, weapon mounts, etc.). However, in all cases, the UAV's primary task is to fly along the designated route to successfully complete the assigned mission.

As the usage of UAVs increases, so does the frequency of accidents caused by malfunctions in the engine-control system. One of the most common issues encountered is the failure of one or more engines during flight. Due to the widespread use of multi-engine drones, various types of these drones have become particularly popular, depending on their intended purpose and the demands placed on them [1-4].

Unlike single-engine drones, engine failure in multi-rotor devices can lead to safety concerns. Numerous published articles suggest addressing this issue by redesigning the control law or adjusting the control power [5, 6]. However, this approach is difficult to implement, as altering the control power of the engines often requires

additional measures, including the integration of extra equipment and devices.

Most scientific and technical literature dedicated to this topic primarily focuses on quadcopters with only one engine failure. These studies mainly explore flight control based on the Euler or Krylov angles for orientation, but there is insufficient material on how to control hexacopters when one engine fails, using quaternion theory methods to describe orientation.

In this research, the possibility of controlling a hexacopter in the event of one engine failure, under conditions of limited engine power, is examined (Figure 1). The proposed approach can help ensure proper control when engine malfunctions occur and increase the likelihood of successfully performing an emergency landing maneuver.



Figure 1. General description of Əqrəb 5.0.

## II. PROBLEM STATEMENT

When examining the case where there are no limitations on the hexacopter's engine power (referred to as the "normal condition" below), it becomes evident that even if two symmetrically positioned engines (Figure 2) fail, the hexacopter can still be controlled along a straight trajectory. The failure of one engine refers to a scenario where one out of the six engines on the hexacopter is not functioning. In such cases, the engine symmetrically positioned relative to the center of the hexacopter is typically turned off.

It is clear that when the number of engines decreases from six to four, it becomes necessary to increase the

power of the remaining engines. When the hexacopter's flight speed is low - in other words, when the engines are operating at lower power—turning off one symmetric engine and increasing the power of the remaining four may be sufficient to maintain the required speed. However, at higher flight speeds, maintaining that speed with only four engines may not be possible due to the existing power limitations.

This raises the question of whether, in a hexacopter with engine power limitations, the failure of one engine can be compensated for by the remaining five engines. This issue is investigated in the article. Below, the mathematical formalization and solution of the problem are presented.

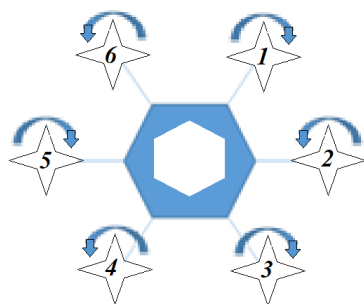


Figure 2. A schematic representation of a hexacopter

### III. KEY CONDITIONS FOR ROUTE FLIGHT CONTROL

When writing the mathematical model for controlling a UAV, two coordinate systems are often considered. These include the inertial coordinate system  $O_GXYZ$  attached to the Earth, with its origin  $O_G$  fixed at a specific point on the Earth's surface, and the local coordinate system  $Oxyz$  attached to the hexacopter, with its origin located at the center of gravity of the hexacopter, used to determine its orientation in space (Figure 3).

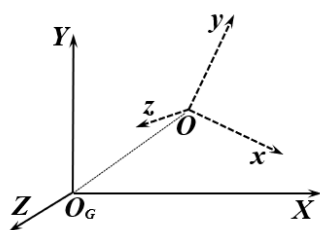


Figure 3. The local and inertial coordinate systems.

We will assume that the  $Ox$  axis lies along the first arm of the hexacopter, the  $Oz$  axis is perpendicular to the  $Ox$  axis within the plane where the arms are positioned, and the  $Oy$  axis is directed along the symmetry plane, perpendicular to the  $Oxy$ . It is considered that in the horizontal stationary state, the  $Oy$  axis is directed upwards, and the  $Oxyz$  system is a positively oriented coordinate system.

For the hexacopter to fly along a straight line relative to the Earth's coordinate system  $O_GXYZ$ , it is first

oriented appropriately by adjusting the rotational speeds of its propellers, achieving the necessary pitch. Once this orientation is established, the hexacopter is controlled along the desired trajectory using the engines, which continue to operate at the appropriate rotational speeds.

It should be noted that this article does not address the calculation of propeller rotation speeds for changing the UAV's orientation.

The UAV's flight along the straight segments of the route differs mainly in terms of direction and how the altitude changes along these segments. Therefore, to determine the solution principle for finding the control parameters of the flight along the route, each straight segment of the route can be considered separately.

Therefore, without loss of generality, it can be assumed that the hexacopter is designed to fly at a specific speed along a straight line connecting two points,  $A(x_a, z_a, 0)$  and  $B(x_b, z_b, 0)$ , within a given plane.

It should be noted that if the hexacopter had a tilt (roll), it would not be able to maintain a straight flight. The non-zero angle formed between the engine's rotational axis and the flight plane would generate a moment that would force the hexacopter to deviate from that plane. Additionally, the pitch of the hexacopter must be adjusted so that the thrust from the engines compensates for the combined forces of gravity and aerodynamic drag along the  $O_GZ$  axis.

This ensures the hexacopter remains on the intended straight path, avoiding deviations due to roll or misaligned thrust.

As illustrated in Figure 1, the rotational axes of the engines in the examined type of hexacopters are aligned parallel to the  $Oy$  axis and form a right angle with the  $Oxz$  plane. For the hexacopter to progress along the designated  $AB$  trajectory, it must adjust its spatial orientation by an angle  $\varphi$  so that the thrust produced by the engines can counterbalance the gravitational force and the aerodynamic drag from the air.

The value of angle  $\varphi$  is determined based on the hexacopter's design (aerodynamic properties) and mass [7]. In this research, the angle  $\alpha$  is assumed to be known.

Therefore, it is necessary to determine the rotational frequencies  $\omega_1, \dots, \omega_6$  of the engines in such a way that the UAV flies along a specific  $AB$  trajectory at a certain speed  $v_0 = (v_x, v_y, 0)$  relative to the  $OXYZ$  coordinate system, while maintaining a constant spatial orientation.

Taking this into account in the hexacopter's equations of motion, and in accordance with [7], the following can be written:

$$\begin{cases} -\omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_5^2 - \omega_6^2 = 0, \\ \omega_1^2 - \frac{1}{2}\omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2 + \frac{1}{2}\omega_5^2 - \omega_6^2 = 0, \\ \omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2 + \omega_5^2 - \omega_6^2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^6 \omega_i^2 = f_0. \quad (2)$$



Here  $f_0 = c_A |v_0| v_z + mg \cos \varphi$ ,  $m$  -hexacopter's mass and  $c_A$  - aerodynamic drag coefficient.

Thus, the quantities  $\omega_1, \dots, \omega_6$  that meet the proposed requirements must satisfy the system of equations (1)-(2).

#### IV. ENSURING CONTROL IN NORMAL OPERATING MODE

Let's assume that all motors of the hexacopter are functioning properly. In this case, we will investigate the determination of the quantities  $\omega_1, \dots, \omega_6$  that satisfy the system of equations (1)-(2).

For each  $k$  denote  $\omega_k^2$  as  $\xi_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, 6$ .

Thus, the system of equations (1)-(2) can be rewritten as follows:

$$\begin{cases} -\xi_2 + \xi_3 + \xi_5 - \xi_6 = 0, \\ 2\xi_1 - \xi_2 + 2\xi_3 - 2\xi_4 + \xi_5 - 2\xi_6 = 0, \\ \xi_1 - \xi_2 + \xi_3 - \xi_4 + \xi_5 - \xi_6 = 0, \\ \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 + \xi_5 + \xi_6 = f_0. \end{cases} \quad (3)$$

As can be seen, equation system (3) is a linear system written with respect to six unknowns, and its rank is equal to four. Therefore, this system has infinitely many distinct solutions.

To choose the most suitable solution from the set of possible solutions, in accordance with the essence of the problem, let's introduce the following optimality criterion:

We seek to minimize the variation in the angular velocities of the motors, ensuring that the hexacopter operates efficiently and maintains stable flight.

This optimality criterion can be formulated as a cost function that seeks to equalize or minimize the deviations in motor performance, ensuring the overall stability and balance of the hexacopter's movement along its intended trajectory.

$$\mathfrak{J} \equiv \sum_{i \neq j} (\xi_i - \xi_j)^2 \rightarrow \min, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6. \quad (4)$$

The minimization of the  $\mathfrak{J}$  functional essentially requires that the values of  $\xi_i$  and ultimately the rotational frequencies  $\omega_k^2$  be as close to each other as possible. This requirement is justified by the fact that during the straight-line movement of the UAV, its motors should ideally be evenly loaded.

From a mathematical perspective, this problem is one of conditional extremum. Various approaches can be applied to solve this problem [8]. In the course of the study, the Kuhn-Tucker method was applied [9-11]. The solution to the conditional extremum problem formulated by equations (3)-(4) yields the following result:

$$\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_6 \approx 0,166f_0.$$

Based on the obtained values of the  $\xi_1, \dots, \xi_6$  quantities, the following values are derived for the rotational frequencies of the propellers:

$$\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_6 \approx 0,4\sqrt{f_0}. \quad (5)$$

Thus, for the hexacopter to fly in a straight line, it is first oriented appropriately by adjusting the rotational frequencies of the propellers to achieve the desired pitch. Subsequently, it is controlled along the trajectory according to the specified rotational frequencies (5).

#### V. ENSURING CONTROL WHEN ONE OF THE ENGINES FAIL

When all engines are functioning normally, optimal control for straight-line flight is achieved by having all the propellers rotate at the same speed. Suppose one of the hexacopter's engines, for instance, the 6th engine, has malfunctioned.

Without loss of generality, we assume the failure is in the 6th engine.

In the case where there are no constraints on the rotational speeds of the remaining engines, the control of the hexacopter's movement has been studied in [5], showing that straight-line control is possible if  $\omega_3 = 0$ .

This raises the question: if the engine power is limited and the remaining engines cannot maintain the necessary rotational speeds, is it possible to control the hexacopter with the five remaining engines in the same manner?

If a solution exists, it must satisfy all the minimums determined by each additional constraint imposed on the system. Clearly, the same result can be obtained if engines 2, 3, or 5 malfunction instead.

If we consider the case where the 1st engine, rather than the 6th, fails, the system can be solved analogously, and again, we arrive at the conclusion that when the engines' power is limited, controlling the hexacopter with five engines is not possible [12].

It should also be noted that the same results are obtained if the 4th engine fails.

Thus, it can be concluded that under the given constraints, it is not feasible to control the hexacopter along a straight trajectory using only five engines.

#### VI. CONCLUSION

Research has shown that when one of the hexacopter's engines fails, it can still continue moving along its original trajectory using the other engines, except for the one symmetrically opposite to the failed engine. In this case, if there are no technical power limitations on the engines, it is necessary to increase the rotation speed of the propellers to maintain the previous flight speed.

However, if there are power constraints, continuing along the trajectory would require a reduction in flight speed. Furthermore, it has been mathematically justified that under such power limitations, the shortage of power across four engines cannot be compensated by the fifth engine to maintain the hexacopter's previous speed along a straight-line trajectory.

### REFERENCES

- [1] Thomas S. Alderete, "Simulator aero model implementation". NASA Ames Research Center, Moffett Field, California, 1995, 21 p.
- [2] Esmat Bekir, "Introduction to modern navigation systems". World scientific, 2007 July 26.
- [3] Cefalo, Massimo, and Josep M. Mirats-Tur. "A comprehensive dynamic model for class-1 tensegrity systems based on quaternions". *International journal of solids and structures* 48, No. 5, 2011, p. 785-802.
- [4] A.A. Bayramov, A.B. Pashayev, E.N. Sabziev, M.M.Tatur, A.Konikov, "Model of navigation and control of unmanned ground vehicles used in agriculture" In Proceedings of the 2nd International Congress on „Applied Sciences”, 2021, p. 217-222, Karabagh, Azerbaijan, 8-10 November 2021.
- [5] Aoki, Yusuke, Yuta Asano, Akihiko Honda, Norizumi Motooka, Kenta Hoshino, and Toshiyuki Ohtsuka. "Nonlinear model predictive control for hexacopter with failed rotors based on quaternions-simulations and hardware experiments". *Mechanical Engineering Journal* 8, No. 5, 2021, p.21-00204.
- [6] Wen, Fu-Hsuan, Fu-Yuen Hsiao, and Jaw-Kuen Shiau. "Analysis and management of motor failures of hexacopter in hover". In *Actuators*, 2021, Vol. 10, No. 3, p. 48. MDPI.
- [7] Gulush Nabadova and Elkhan Sabziev. "Mathematical Model of a Hexacopter-Type Unmanned Aerial Vehicle". In International conference on problems of logistics, management and operation in the east-west transport corridor, 2021, pp. 134-138.
- [8] Dimitri P.Bertsekas, "Constrained optimization and Lagrange multiplier methods". Academic press, 2014, ISBN 1-886529--04-3.
- [9] H.W.Kuhnand, A.W.Tucker, Nonlinear programming, in J.Neyman,ed., Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, University of California Press, Berkeley, CA, 1951, 481–492.
- [10] W.Karush, Minima of Functions of Several Variables with Inequalities as Side Conditions, M. S. thesis, Department of Mathematics, University of Chicago, Chicago, 1939.
- [11] F. John, Extremum problems with inequalities as side conditions, in K. O. Fridrichs, O. E. Neugebauer, and J. J. Stoker, eds., *Studies and Essays: Courant Anniversary Volume*, Wiley, NewYork, 1948.
- [12] Cheng, Gengdong, Lin Xu, and Lei Jiang, "A sequential approximate programming strategy for reliability-based structural optimization". *Computers & Structures*, 2006, Vol. 84, No. 21, p.1353-1367.

# On solvability of the matrix equation $AX + YB = C$ over principal ideal domains

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.081>

Volodymyr Prokip  
IAPMM NAS of Ukraine,  
v.prokip@gmail.com

**Abstract** – In this communication we present conditions for solvability of the matrix equation  $AX + YB = C$  over the ring of integers  $\mathbb{Z}$ . The necessary and sufficient conditions for the solvability of this equation in terms of the Smith normal forms of the matrices  $A$  and  $B$  are given. The conditions under which this equation has a minimal solution are also given.

**Keywords** – ring of integers; field; Smith normal form; matrix equation; solution

## I. INTRODUCTION

Let  $\mathbb{Z}$  be the ring of integers. We denote by  $(a, b)$  the greatest common divisor of nonzero elements  $a, b \in \mathbb{Z}$ . Further, let  $\mathbb{Z}_{m,n}$  be the set of  $m \times n$  matrices over  $\mathbb{Z}$ . Denote by  $I_n$  the identity matrix of dimension  $n$  and by  $0_{m,n}$  the zero  $m \times n$  matrix. We will denote by  $GL(m, \mathbb{Z})$  the set of invertible matrices in  $\mathbb{Z}_{m,m}$ .

Let  $D \in \mathbb{Z}_{m,n}$  and  $\text{rank } D = r$ . For matrix  $D$  there exist matrices  $U, V \in GL(m, \mathbb{Z})$  such that

$$UDV = S_D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_r, 0, \dots, 0)$$

is the Smith normal form of matrix  $D$ , i.e.  $d_i \in \mathbb{Z}$  and  $d_i | d_{i+1}$  (divides) for all  $i = 1, 2, \dots, r-1$ . The matrix  $S_A$  we write in the form  $S_A = \text{diag}(S(A), 0, \dots, 0)$ , where

$$S(A) = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_r).$$

Consider the matrix equation

$$AX + YB = C, \tag{1}$$

where  $A \in \mathbb{Z}_{m,m}$ ,  $B \in \mathbb{Z}_{n,n}$ ,  $C \in \mathbb{Z}_{m,n}$ ,  $X$  and  $Y$  are unknown  $m \times n$  matrices over  $\mathbb{Z}$ .

The main problem of studying the linear matrix equation (1) is to give conditions for its solvability. In addition, it is also necessary to know the structure of a general solution of this equation. The equation (1) is one of the best known matrix equations in matrix theory and its applications. The problem of solvability of equation (1) has drawn the attention of many mathematicians.

Roth [16] showed that equation (1) is consistent over a field  $\mathbb{F}$  if and only if matrices

$$M_C = \begin{bmatrix} A & C \\ 0_{n,m} & B \end{bmatrix} \text{ and } M_0 = \begin{bmatrix} A & 0_{m,n} \\ 0_{n,m} & B \end{bmatrix}$$

are equivalent. Roth's condition is equivalent to the following statement: Equation (1) is consistent over a field  $\mathbb{F}$  if and only if

$$\text{rank } M_C = \text{rank } A + \text{rank } B.$$

Through the generalized inverses of matrices, Bakalary and Kala [1] showed that equation (1) over a field is consistent if and only if the following condition holds:  $(I_m - AA^-)C(I_m - B^-B) = 0_{m,n}$  and gave the general solutions of (1), where  $A^-$  and  $B^-$  are generalized inverse of matrices  $A$  and  $B$  respectively. Many authors addressed the question when the equation (1) (over the real numbers  $\mathbb{R}$ , the complex number  $\mathbb{C}$ , the quaternion skew field  $\mathbb{H}$  or commutative rings has a solution belonging to a special class of matrices (see [4], [6–13], [19] and references therein).

Let  $R$  be a commutative ring with identity. In [7] was prove the following statement: The matrix equation  $AX + YB = C$  is solvable over  $R$  if and only if matrices  $M_C$  and  $M_0$  are equivalent (see also [8]).

If matrices  $A \in \mathbb{Z}_{m,m}$  and  $B \in \mathbb{Z}_{n,n}$  are nonsingular with respectively prime determinants then equation (1) is solvable over  $\mathbb{Z}$  for arbitrary matrix  $C \in \mathbb{Z}_{m,n}$ . In this report we give necessary and sufficient conditions of solvability of matrix equation (1) over  $\mathbb{Z}$  in terms of the Smith normal forms of matrices  $A$  and  $B$ .

## II. MAIN RESULTS

**Theorem 1.** Let  $A \in \mathbb{Z}_{m,m}$ ,  $B \in \mathbb{Z}_{n,n}$ ,  $C \in \mathbb{Z}_{m,n}$  and  $\text{rank } A = p$ ,  $\text{rank } B = q$ . Further, let  $U_1, V_1 \in GL(m, \mathbb{Z})$  and  $U_2, V_2 \in GL(n, \mathbb{Z})$  such that

$$U_1 A V_1 = S_A = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_p, 0, \dots, 0)$$

and

$$U_2 B V_2 = S_B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_q, 0, \dots, 0).$$

Matrix equation  $AX + YB = C$  is solvable over  $\mathbb{Z}$  if and only if the following conditions are held

$$\mathbf{a)} \quad U_1 C V_2 = \begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{p1} & \cdots & f_{pq} \\ \hline & Q & \\ & & \mathbf{0}_{m-p, n-q} \end{bmatrix} P,$$

where  $f_{ij} \in \mathbb{Z}$ ,  $P \in \mathbb{Z}_{p, n-p}$  and  $Q \in \mathbb{Z}_{m-p, q}$ ;

$\mathbf{b)} (a_i, b_j) | f_{ij}$  for all  $i=1, 2, \dots, p$ ;  $j=1, 2, \dots, q$   
and  $P = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_p) P_1$ ,  $Q = Q_1 \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_q)$ .

**Proof.** Let  $m \times n$  matrices  $X_0$  and  $Y_0$  over  $\mathbb{Z}$  be a solution of equation (1). Further, let  $U_1, V_1 \in GL(m, \mathbb{Z})$  and  $U_2, V_2 \in GL(n, \mathbb{Z})$  such that

$$U_1 A V_1 = S_A = \text{diag}(S(A), 0, \dots, 0)$$

and

$$U_2 B V_2 = S_B \text{diag}(S(B), 0, \dots, 0).$$

From equality  $A X_0 + Y_0 B = C$  we have

$$S_A \tilde{X}_0 + \tilde{Y}_0 S_B = C_0, \quad (2)$$

Put

$$X_0 = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix}, Y_0 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}, C_0 = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix},$$

where

$$\tilde{X}_0 = V_1^{-1} X_0 V_2 = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix}, X_{11} \in \mathbb{Z}_{p, q}, X_{12} \in \mathbb{Z}_{p, n-p},$$

$$\tilde{Y}_0 = U_1 Y_0 U_2^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}, Y_{11} \in \mathbb{Z}_{p, q}, Y_{21} \in \mathbb{Z}_{m-p, q},$$

$$C_0 = U_1 C V_2 = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}, C_{11} \in \mathbb{Z}_{p, q}, C_{12} \in \mathbb{Z}_{m-p, q},$$

$$C_{21} \in \mathbb{Z}_{n-p, q}.$$

From equality (2) follows

$$\begin{cases} S(A)X_{11} + Y_{11}S(B) & = F, \\ S(A)X_{12} & = P, \\ Y_{21}S(B) & = Q, \\ \mathbf{0}_{m-p, n-q} & = C_{22}. \end{cases}$$

Thus, from the first equality of this system of equalities, we obtain  $(a_i, b_j) | f_{ij}$  for all  $1 \leq i \leq p$  and  $1 \leq j \leq q$ .

Conversely, suppose  $(a_i, b_j) | f_{ij}$  for all  $1 \leq i \leq p$  and  $1 \leq j \leq q$ . Thus, there exist elements  $p_{ik}, q_{kj} \in \mathbb{Z}$  such that  $a_i p_{ik} + b_j q_{kj} = f_{ij}$ . Hence, there exist matrices  $P_{11} \in \mathbb{Z}_{p, q}$ ,  $Q_{11} \in \mathbb{Z}_{p, q}$  such that  $S(A)P_{11} + Q_{11}S(B) = F$ . Considering equalities  $S(A)X_{12} = P$  and  $Y_{21}S(B) = Q$ , we obtain  $X_{12} = P_{12} \in \mathbb{Z}_{p, n-p}$  and  $Y_{21} = Q_{21} \in \mathbb{Z}_{m-p, q}$ . So, for any matrices  $P_{22} \in \mathbb{Z}_{m-p, n-q}$  and  $Q_{22} \in \mathbb{Z}_{m-p, n-q}$  the following equality holds

$$S_A \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ 0 & P_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} S_B = \begin{bmatrix} P_{21} & P_{21} \\ P_{21} & 0 \end{bmatrix}.$$

From this equality it follows that equation (2) is solvable.

It is obvious that the pair of matrices  $X_p = V^{-1} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ 0 & P_{22} \end{bmatrix} V_2$  and  $Y_Q = U_1^{-1} \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} U_2^{-1}$  is a general solution of equation (1). The proof of Theorem 1 is complete.

From the proof of the sufficiency of Theorem 1, we obtain a method for constructing the general solution of equation (1).

The ring  $\mathbb{Z}$  is an Euclidian domain. In the ring  $\mathbb{Z}$  is defined a nonnegative integral valued function so satisfying the following conditions:

- $\mathbf{a)}$   $\varphi(a) = 0$  if  $a = 0$  is the zero of  $\mathbb{Z}$ ;
- $\mathbf{b)}$   $\varphi(a) = \varphi(b)$  if  $a$  divides  $b$ ;
- $\mathbf{c)}$  for any pair of elements  $a, b \in \mathbb{Z}$  there exist elements  $q, r \in \mathbb{Z}$  such that  $a = bq + r$  and  $\varphi(r) < \varphi(b)$ .

In general, the existence of  $q$  and  $r$  is not assumed to be unique. We defined the integral function of the Euclidean norm in the domain  $\mathbb{Z}$  as follows  $\varphi(b) = |b|$  and  $\varphi(r) \geq 0$ , i.e.  $\varphi(r) \in \{0, 1, \dots, |b| - 1\}$ . Thus, for arbitrary elements  $a, b \in E$  there exist unique elements  $q, r \in \mathbb{Z}$  such that  $a = bq + r$  and  $\varphi(r) < \varphi(b)$ . We note that this property of the Euclidean norm  $\varphi$  holds for the ring of polynomials  $F[\lambda]$  over a field  $F$ .

Consider the equation  $ax + by = c$ , where  $a, b, c \in \mathbb{Z}$  and  $x, y$  are unknown elements in  $\mathbb{Z}$ . We say that a pair of elements  $x_0, y_0 \in \mathbb{Z}$  is a minimal solution (with respect to  $y$ ) of the equation  $ax + by = c$  if

$$\varphi(y_0) < \varphi(a).$$

**Proposition 1.** Let  $a, b, c \in \mathbb{Z}$  be nonzero elements. The equation  $ax + by = c$  has a unique "minimal" solution  $x_0, y_0$  over  $\mathbb{Z}$  such that  $\varphi(y_0) < \varphi(a)$  if and only if elements  $a$  and  $b$  are relatively prime, i.e.  $(a, b) = e$ .

Denote by  $\mathbb{Z}_+$  the set of nonnegative integers of the domain  $\mathbb{Z}$ . For nonsingular matrix  $A \in \mathbb{Z}_{m, m}$  there exists a matrix  $W \in GL(m, \mathbb{Z})$  such that

$$AW = H_A = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ h_{21} & h_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_{m1} & h_{m2} & \cdots & h_{m, m-1} & h_m \end{bmatrix}$$

is a lower triangular matrix in which  $h_i \in \mathbb{Z}_+$  for all  $1 \leq i \leq m$  and  $\varphi(h_{ij}) < \varphi(h_i)$  for all  $1 \leq j < i \leq m$ . The matrix  $H_A$  is called the Hermitian normal form of the matrix  $A$ . Taking into account Proposition 1 and article [15], we get the following statement.

**Theorem 2.** Let  $A \in \mathbb{Z}_{m, m}$  and  $B \in \mathbb{Z}_{n, n}$  be nonsingular matrices and  $C \in \mathbb{Z}_{m, n}$ . Further, let

$$H_A = AW = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ h_{21} & h_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{m1} & h_{m2} & \dots & h_{m,m-1} & h_m \end{bmatrix}$$

be the Hermitian normal form of the matrix  $A$ , where  $W \in GL(m, \mathbb{Z})$ . The matrix equation

$$AX + YB = C$$

has a unique “minimal” solution  $X_0 \in \mathbb{Z}_{n,m}$  and

$$Y_0 = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n-1} & y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{k1} & y_{k2} & \dots & y_{k,n-1} & y_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{m,n-1} & y_{mn} \end{bmatrix} \in \mathbb{Z}_{m,n}$$

such that for all  $\varphi(y_{ik}) < \varphi(h_i)$  for all  $1 \leq i \leq m$  and  $1 \leq k \leq n$  if and only if  $(\det A, \det B) = 1$ .

Let  $F[\lambda]$  be the polynomials ring over a field  $F$ . We defined the integral function of the Euclidean norm in the domain  $F[\lambda]$  as follows  $\varphi(a(\lambda)) = \deg a(\lambda)$ .

The polynomial Diophantine equations are used in the theory of control systems as a special mathematical object whose application makes it possible to efficiently solve a broad range of the problems of synthesis of systems, including control systems. The entire classical automata theory is, in fact, constructed on the basis of the Diophantine equations (both in the scalar form and in the matrix form). A significant part of available methods used for the synthesis of linear systems can be described as methods aimed at finding solutions of the matrix polynomial equation

$$A(\lambda)X(\lambda) + Y(\lambda)B(\lambda) = C(\lambda) \tag{3}$$

(and, in particular, of the “minimal” solutions). In this case, the search and construction of all classes of solutions of linear polynomial equations depends on the number of steps of divisibility of polynomials with remainders and can be obtained in the explicit form as a result of proper substitutions.

In his investigations of the structures of polynomial matrices over the field, Barnett [2] showed that regular matrices  $A(\lambda) \in F_{m,m}[\lambda]$  and  $B(\lambda) \in F_{n,n}[\lambda]$  have coprime determinants if and only if for any  $m \times n$  matrix  $C(\lambda)$  such that

$$\deg C(\lambda) \leq \deg A(\lambda) + \deg B(\lambda)$$

matrix equation (3) possesses a unique minimal solution such that  $\deg X_0(\lambda) < \deg B(\lambda)$  and

$$\deg Y_0(\lambda) < \deg A(\lambda).$$

The conditions under which the minimal solution of equation (3) exists were weakened in [5] and [14, 18]. Thus, in [5], it was proved that the Barnett condition for the existence of the unique minimal solution can be weakened as follows: the unique minimal solution of equation (3) exists in the case where only one of the matrices  $A(\lambda)$  or  $B(\lambda)$  is regular. More recent investigations showed that the conditions of existence of the

minimal solution of equation (3) established in [5] can also be weakened. Indeed, the following assertion was proved in [14]: The unique minimal solution of equation (3) exists if at least one of irregular and nonsingular matrices  $A(\lambda)$  and  $B(\lambda)$  with coprime determinants can be regularized ( $A(\lambda)$  from the left or  $B(\lambda)$  from the right). Thus, the conditions of [5] cover a much broader class of equations of the form (3) for which it is possible to indicate the minimal solution. The methods used for the construction of solutions of equation (3) under certain restrictions were presented in [15, 16].

We defined the Euclidean norm in the domain  $F[\lambda]$  as follows  $\varphi(a(\lambda)) = \deg a(\lambda)$ .

**Proposition 2.** Let  $a(\lambda), b(\lambda), c(\lambda) \in F[\lambda]$  be nonzero elements. The equation

$$a(\lambda)x(\lambda) + b(\lambda)y(\lambda) = c(\lambda)$$

has a unique “minimal” solution  $x_0(\lambda), y_0(\lambda)$  over  $F[\lambda]$  such that  $\deg y_0(\lambda) < \deg a(\lambda)$  if and only if elements  $a(\lambda)$  and  $b(\lambda)$  are relatively prime, i.e.  $(a(\lambda), b(\lambda)) = 1$ .

Using Proposition 2 and [16], we formulate a condition under which equation (6) has a “minimal” solution under certain restrictions.

**Theorem 3.** Let  $A(\lambda) \in F_{m,m}[\lambda]$  and  $B(\lambda) \in F_{n,n}[\lambda]$  be nonsingular matrices and  $C(\lambda) \in F_{m,n}[\lambda]$ . Further, let

$$H_A(\lambda) = A(\lambda)W(\lambda) = \begin{bmatrix} h_1(\lambda) & 0 & \dots & \dots & 0 \\ h_{21}(\lambda) & h_2(\lambda) & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{m1}(\lambda) & h_{m2}(\lambda) & \dots & h_{m,m-1}(\lambda) & h_m(\lambda) \end{bmatrix}$$

be the Hermitian normal form of the matrix  $A(\lambda)$ , where  $W(\lambda) \in GL(m, F[\lambda])$ ,  $h_i(\lambda) \in F[\lambda]$  are monic polynomials and  $\deg h_{ij}(\lambda) < \deg h_i(\lambda)$  for all  $1 \leq i \leq m$  and  $1 \leq j < i \leq m$ . The matrix equation

$$A(\lambda)X(\lambda) + Y(\lambda)B(\lambda) = C(\lambda)$$

has a unique “minimal” solution  $X_0(\lambda) \in F_{n,m}(\lambda)$  and

$$Y_0(\lambda) = \begin{bmatrix} y_{11}(\lambda) & \dots & y_{1l}(\lambda) & \dots & y_{1n}(\lambda) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{k1}(\lambda) & \dots & y_{kl}(\lambda) & \dots & y_{kn}(\lambda) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{m1}(\lambda) & \dots & y_{ml}(\lambda) & \dots & y_{mn}(\lambda) \end{bmatrix} \in F_{m,n}[\lambda]$$

such that for all  $\deg y_{ik}(\lambda) < \deg h_i(\lambda)$  for all  $1 \leq i \leq m$  and  $1 \leq k \leq n$  if and only if  $(\det A(\lambda), \det B(\lambda)) = 1$ .



REFERENCES

- [1] J.K. Baksalary, R. Kala, “The matrix equation  $AX-YB=C$ ”, *Linear Algebra and Applications*, 1979, Vol. **25**, pp. 41–43.
- [2] S. Barnett, “Regular polynomial matrices having relatively prime determinants”, *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, 1969, Vol. **65**, No.3, pp.585–590.
- [3] S. Chen., Y. Tian, “On solutions of generalized Sylvester equation in polynomial matrices”, *J. Franklin Inst.*, 2014, Vol. **351**, No.12, pp.5376–5385.
- [4] E. Emre, L.M. Silverman, “The equation  $XR + QY = \Phi$  : a characterization of solutions”, *SIAM J. Control Optim.*, 1981, Vol. **19**, No.1, pp.33–38.
- [5] J. Feinstein, Y. Bar-Ness, “On the uniqueness minimal solution to the matrix polynomial equation  $A(\lambda)X(\lambda)+Y(\lambda)B(\lambda) = C(\lambda)$ ”, *J. Franklin Inst.*, 1980, Vol. **310**, No.2, pp.131–134.
- [6] H. Flanders, H.K. Wimmer, “On the matrix equations  $AX-XB=C$  and  $AX-YB=C$ ”, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1977, Vol. **32**, № 4, pp.707–710.
- [7] W.H. Gustafson, “Roth's theorems over commutative rings”, *Linear Algebra and its Applications*, 1979, Vol. **23**, pp.245–251.
- [8] R.E. Harwig, “Roth's equivalence problem in unit regular ring”, *Proc. Amer. Math. Society*, 1976, Vol. **76**, № 1, pp.39–44.
- [9] J. (Jr.) Jones, “A Diophantine matrix equation”, *Amer. Math. Monthly*, 1955, Vol. **62**, No.4, pp. 244–247.
- [10] Y.H. Liu, “Ranks of solutions of the linear matrix equation  $AX + YB = C$ ”, *Computers & Mathematics with Applications*, 2006, Vol.**52**, No.6-7, pp.861–872.
- [11] Y. Ke, C. Ma, “An alternating direction method for nonnegative solutions of the matrix equation  $AX+ YB= C$ ”, *Computational and Applied Mathematics*, 2017, Vol.**36**, pp.359–365.
- [12] I. Kyrchei, “Cramer's Rules for Sylvester Quaternion Matrix Equation and Its Special Cases”, *Adv. Appl. Clifford Algebras*, 2018, Vol. **28**, pp.1–26.
- [13] V. Olshevsky, “Similarity of block diagonal and block triangular matrices”, *Integral equations and operator theory*, 1992, Vol.**15**, № 5, pp. 853–863.
- [14] V.M. Prokip, “About the uniqueness solution of the matrix polynomial equation  $A(\lambda)X(\lambda) - Y(\lambda)B(\lambda) = C(\lambda)$ ”, *Lobachevskii J. Math.*, 2008, Vol.**29**, No.3, pp.186–191.
- [15] 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.
- [16] V.M. Prokip, O.M. Mel'nyk and R.V. Kolyada, “On divisibility with a remainder of polynomial matrices over an arbitrary field”, *J. Math. Sci.*, 2024, Vol. **250**, No.1-2, pp.24–39.
- [17] W. E. Roth, “The equation  $AX - YB = C$  and  $AX - XB = C$  in matrices”, *Proc. Amer. Math. Society*, 1952, Vol.**97**, pp.392–396.
- [18] Y. Tian, C. Xia, “On the low-degree solution of the Sylvester matrix polynomial equation”, *Hindawi J. Math.*, 2021, Vol.**2021**, Article ID 4612177.
- [19] K. Zietak. “Properties of the  $l_j$ -solutions of the Linear Matrix Equation  $AX+ YB= C$ ”, *IMA journal of numerical analysis*, 1987, Vol. **7**, No.2, pp.223–233.

# Modeling of Filtration Processes with Extended Sources and Homogenization

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.082>

Gennadiy Sandrakov

Taras Shevchenko National University of Kyiv

Kyiv, Ukraine

gsandrako@gmail.com

**Abstract** – Methods for modeling dynamic filtration processes with extended sources will be considered. These methods are based on the homogenization of the relevant initial boundary value problems. This approach leads to the description of several filtration modes, the implementation of which depends on the orders of the filtration, transfer, and potentiality coefficients. The problems for describing these modes have constant coefficients and can be solved analytically or numerically. The accuracy of the approximations is also established.

**Keywords** – initial boundary value problems; asymptotic expansion; accuracy estimates; multiscale porous media; approximation.

## I. INTRODUCTION

Modern wells are realized with extended horizontal drains and sources, which are the main elements in oil and gas production. It is an interesting mystery how it is possible to realize such wells, which usually start vertically and then turn into a horizontal plane (sometimes such horizontal components are realized in several parallel planes, which is an even bigger mystery). But it is generally accepted that such wells are the most effective as drains and sources. Sometimes these sources are used to pump auxiliary fluids, which are often heated to better affect pumping out through drains from the well.

Such wells can be used to solve environmental problems, for example, to prevent groundwater pollution and to find methods for cleaning already polluted water resources. From an environmental point of view, it is also important to understand what will remain after using such wells for oil and gas production. Studying these processes using engineering observation methods in underground environments seems to be a rather expensive undertaking, since it requires the installation of various sensors at many points and at different depths. In addition, such processes are dynamic and long-lasting, and therefore require long-term monitoring of sensors, which can also be very expensive.

Thus, mathematical modeling is relevant for studying and understanding these processes, since the availability of sufficiently powerful computers and modern software packages allows for fairly quick calculations, for example, of possible modes of oil and gas production or groundwater purification. However, before implementing the calculations, it is necessary to

select a model and conduct a mathematical analysis of this model. The real model is a dynamic model of (single-phase) filtration in a porous medium, where the presence of extended horizontal drains and sources is taken into account by suitable delta functions.

In this case, drains and sources differ only in the sign of these delta functions, and then only sources can be considered. In addition, the equations of this model are linear, so only one delta function can be used to model a horizontal source. These are the models that will be discussed here. However, it should be taken into account that delta functions are quite singular and standard methods are not directly applicable. In the future, it is not difficult to transfer the methods used here to two-phase filtration and to coupled models that take into account heat distribution when heating injected liquids.

The coupled models of the process of two-phase non-isothermal filtration are considered in sufficient detail, for example, in [1], where methods of complex analysis are used, which are essentially two-dimensional and are applicable only to domains located on a plane. The stationary single-phase version of this model is considered in [2], where three possible filtration regimes are described by homogenization methods.

These regimes depend on the orders of the filtration coefficients in comparison with the microscale coefficient. This scale coefficient arises from the assumption that the porous medium is heterogeneous and multiscale. A periodic medium is chosen as the simplest model there, which made it possible to apply asymptotic methods for homogenizing heterogeneity and separating the scales of the problem using the asymptotic expansion methods presented in detail in [3]. Periodicity is natural for artificial porous media. However, promisingly, the homogenization methods used are quite standardly generalized to stochastic multiscale media. Note that the multi-scale nature is typical for the problems under consideration, for example, according to [4], where different versions of these problems are presented and discussed.

## II. METHODS

It is known [5] that usually in filtration models homogeneous media are considered, the filtration coefficients of which are obtained by volume averaging without justification of this transition. However, with this approach it is not clear how to distinguish filtration

modes by separating scales, which in a sense are erased by volume averaging. Thus, we consider a periodic porous medium with sources, which is modeled by initial boundary value problems for non-stationary equations depending on additional multiscale parameters. Homogenization of such problems with additional parameters for non-singular data is discussed in some detail in [3].

This approach, presented also in [2], makes it possible to separate scales and identify possible filtration modes for singular data. This allows us to obtain homogenized initial boundary value problems as approximations of the solutions under study and to prove approximation accuracy. Another approach is known, using which multiscale problems are get as approximations for solutions of filtration problems in periodic porous media, for example, according to [6] and [7]. But, the two-scale homogenized problems depend on two micro and macro variables and the type of such equations is not clear. Moreover, in this case, the accuracy approximation is not proven.

Thus, dynamic filtration processes with extended sources in periodic media and homogenization will be discussed. The resulting homogenized models will depend on the orders of the filtration coefficients and potentiality. These coefficients are variable, but naturally can also be constant. However, the emergence of possible filtering modes is influenced primarily by the orders of the coefficients in comparison with the scale parameter. To derive these models, the asymptotic scale separation algorithm presented in [3] is used substantially. This makes it possible to separate scale variables and describe homogenized filtering modes. The sources under consideration are modeled by delta functions, which are quite singular and the results of [8] and [9] will be useful here.

Stationary versions of the discussed problems are also used as models for simulating blood flows, vascular networks and transport processes in tissue, for example, according to [10]–[14]. The weighted space method was used in [10] and the singularity subtraction method was applied in [11] and [12] to study such problems. General methods for simulating such problems were proposed in [13] and [14]. Such methods were applied to equations with constant coefficients and it is not clear whether they can be generalized to non-stationary equations with variable coefficients. The methods of a priori estimates and singularity subtractions are used here.

### III. CONCLUSIONS

Thus, homogenization methods for modeling dynamic filtration processes with extended sources are discussed. These methods lead to approximations of solutions to the dynamic problems under consideration. Estimates of the accuracy of such approximations are also discussed. Depending on the orders of the coefficients of filtration, transport, and potentiality compared to the multiscale parameter, several filtration regimes are investigated. Understanding such regimes may be useful for broader applications beyond filtration, as these patterns may arise in simulating blood flows, vascular networks, and transport in tissue processes.

### 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. Ya. Bomba, V. I. Boitsov, S. V. Yaroshchak, "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).
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Shib Sankar Ganguli, Vijay Prasad Dimri (eds.), "Reservoir characterization, modeling, and quantitative interpretation", Elsevier, Amsterdam, 2023. isbn: 978-0-323-99593-1
- [5] 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
- [6] 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
- [7] S. Gattner, 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
- [8] G. Dolzmann, S. Muller, "Estimates for Green's matrices of elliptic systems by  $L_p$  theory", *Manuscripta Math.*, vol. 88, pp. 261-273, 1995. doi: 10.1007/BF02567822
- [9] G. Sakellaris, "On scale-invariant bounds for the Green's function for second-order elliptic equations with lower-order coefficients and applications", *Analysis and PDE*, vol. 14:1, pp. 251-299, 2021. doi: 10.2140/apde.2021.14.251
- [10] C. D'Angelo, "Finite element approximation of elliptic problems with dirac measure terms in weighted spaces: Applications to one- and three-dimensional coupled problems", *SIAM J. Numerical Analysis*, vol. 50:1, pp. 194-215, 2012. doi: 10.1137/100813853
- [11] I. G. Gjerde, K. Kumar, J. M. Nordbotten, B. Wohlmuth, "Splitting method for elliptic equations with line sources", *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, vol. 53:5, pp. 1715-1739, 2019. doi: 10.1051/m2an/2019027
- [12] T. Koppl, E. Vidotto, B. Wohlmuth, "A 3D-1D coupled blood flow and oxygen transport model to generate microvascular networks", *Int. J. Numerical Methods in Biomedical Engineering*, vol. 36:10, e3386, 2020. doi: 10.1002/cnm.3386
- [13] I. G. Gjerde, K. Kumar, J. M. Nordbotten, "A singularity removal method for coupled 1d-3d flow models", *Computational Geosciences*, vol. 24, pp. 443-457, 2020. doi: 10.1007/s10596-019-09899-4
- [14] T. Koch, M. Schneider, R. Helmig, P. Jenny, "Modeling tissue perfusion in terms of 1d-3d embedded mixed-dimension coupled problems with distributed sources", *J. Computational Physics*, vol. 410:109370, 2020. doi: 10.1016/j.jcp.2020.109370

# *Modification of the filtration consolidation equation and kinematic boundary condition into the case of biodegradation processes*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.083>

Liubov Shostak

National University of Water and Environmental Engineering  
Rivne, Ukraine

[l.v.shostak@nuwm.edu.ua](mailto:l.v.shostak@nuwm.edu.ua)

**Abstract** – This work considers the modification of the filtration consolidation equation to describe the settlement processes of municipal solid waste (MSW) landfills, taking into account the influence of biodegradation processes. The mathematical model incorporates the thermal effect resulting from biodegradation processes and introduces boundary conditions to describe the interaction of heat and fluid pressure. The corresponding mathematical model is described by the Stefan boundary value problem for a system of differential equations of biodegradation and two quasilinear parabolic equations. One of the equations describes the change in thermal state in a porous medium, while the other describes the change in excess pore pressure in the pore fluid. This approach allows for avoiding the determination of the stress-strain state and modeling the microbiological dynamics. The finite element method was used to find the solutions to the corresponding boundary value problem. The obtained results assess the change in the dynamics of the settlement of MSW landfills considering biodegradation and non-isothermal conditions

**Keywords** – MSW; settlement; biodegradation; consolidation; boundary condition; thermal processes

## I. INTRODUCTION

The disposal of MSW through the creation of special landfills is an important environmental issue. As noted in [1], according to World Bank statistics, the global amount of generated MSW was 2.01 billion tons in 2016, and this figure is projected to reach 3.4 billion tons by 2050. The composition of this waste depends on landfill management methods. One of the main problems is the settlement of landfills. Predicting this process requires consideration of temperature regime, humidity, and biodegradation processes [2].

To model the settlement process, theoretical analysis, laboratory studies, numerical modeling, and field measurements are employed. Each of these approaches has its advantages and disadvantages. For example, models that account for biodegradation often assume that the pore space created by the decomposition of organic residues is fully filled with solid phase. However, such models frequently depend on the kinetics of biodegradation processes and field experiments, complicating their use for modeling. The paper [3] examined the influence of microorganism dynamics on the consolidation of a waste repository. However, it did

not address the issues of temperature effects and greenhouse gas generation.

One example of previous research is the work in [4], which developed a theory of one-dimensional nonlinear consolidation considering the thermal effect. However, this approach did not take into account the biodegradation processes, which are key factors in landfill settlement. This process is a result of biodegradation processes and mechanical compaction of materials. Biodegradation processes are accompanied by the release of greenhouse gases and heat, which complicates the prediction of landfill settlement dynamics. Temperature effects have an important impact on the environment and on processes in porous media. For example, the influence of non-isothermal conditions on humus formation processes was studied in [5].

This paper presents a modification of the filtration consolidation model that accounts for biodegradation processes. This approach allows for the description of settlement processes through a system of equations for the kinetics of biodegradation and two quasilinear equations that describe changes in thermal state and pore pressure. The application of this approach enables the avoidance of modeling microbiological dynamics and the stress-strain state, which in turn simplifies the model.

## II. KINEMATIC BOUNDARY CONDITION FOR THE UPPER MOVABLE SURFACE OF THE LANDFILL CONSIDERING BIODEGRADATION PROCESSES

The settlement process of the surface of MSW landfills is largely determined by the biodegradation of organic waste residues. To model this process, a kinematic boundary condition has been developed that accounts for the movement of the upper boundary of the landfill due to biodegradation. In this model, settlement depends on the modification of the volume of the porous medium, which is influenced by the amount of organic residue transformation and changes in pore space.

In this model, as in the work [6], we assume that the surface settlement occurs in the vertical direction. To maintain the consistency of the material presentation, we will present some already known facts and derivations. First

$$\frac{dl(t)}{dt} = - \int_{l(t)}^L \frac{d\varepsilon(z,t)}{dt} dz, \quad (1)$$

where the integration is carried out over the vertical segment  $[l(t); L]$ ,  $l(t)$  is the upper boundary of the porous medium,  $L$  is the lower boundary of the porous medium, and  $\varepsilon(x,t)$  is the volumetric strain of the porous medium. Secondly, it is known that condition (1) was derived based on the integral sum

$$\frac{l(t+\Delta t) - l(t)}{\Delta t} = - \sum_{i=1}^m \frac{\varepsilon_i(t+\Delta t) - \varepsilon_i(t)}{\Delta t} \Delta z_i,$$

where  $m$  is the number of fragments with volumes  $V_i$  ( $i = 1, m$ ) of the porous medium, covering the vertical segment  $[l(t); L]$ .

Considering the biodegradation processes, the volume  $V_i$  change over a certain time interval  $\Delta t$  can occur due to changes in pore volume  $\Pi_i V_i$  as well as changes in the volume of organic components of the porous medium,  $W_i V_i$ . Therefore, we obtain

$$\begin{aligned} V_i(t) - V_i(t+\Delta t) &= \Pi_i(t)V_i(t) - \Pi_i(t+\Delta t) \times \\ &\times V_i(t+\Delta t) + W_i(t)V_i(t) - W_i(t+\Delta t)V_i(t+\Delta t), \end{aligned} \quad (2)$$

where  $\Pi_i(t)$  is the average porosity of the medium in the selected segment,  $W_i(t)$  is the relative volumetric content of the organic component in the selected segment (both quantities are dimensionless, expressed in  $\frac{m^3}{m^3}$ ).

Considering that  $\Delta V_i = V_i(t) - V_i(t+\Delta t)$  from equation (2), we obtain

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_i}{V_i(t)} &= \Pi_i(t) - \Pi_i(t+\Delta t) + \Pi_i(t+\Delta t) \frac{\Delta V_i}{V_i(t)} + \\ &+ W_i(t) - W_i(t+\Delta t) + W_i(t+\Delta t) \frac{\Delta V_i}{V_i(t)}. \end{aligned}$$

Since, by definition, the relative volumetric strain of the porous medium is  $\frac{\Delta V_i}{V_i(t)} = \varepsilon_i$ , then

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_i &= \Pi_i(t) - \Pi_i(t+\Delta t) + \Pi_i(t+\Delta t) \Delta \varepsilon_i + \\ &+ W_i(t) - W_i(t+\Delta t) + W_i(t+\Delta t) \Delta \varepsilon_i, \\ (1 - \Pi_i(t+\Delta t) - W_i(t+\Delta t)) \Delta \varepsilon_i &= \\ &= - \left( \frac{d\Pi_i(t)}{dt} + \frac{dW_i(t)}{dt} \right) \Delta t, \end{aligned}$$

where in the above relation, higher-order infinitesimals are neglected (as  $\Delta t \rightarrow 0$ ).

Taking into account that  $\Pi_i = \frac{e_i}{1+e_i}$ , where  $e_i$  represents the average void ratio in the chosen segment of the medium, we derive

$$\begin{aligned} &\left( 1 - \frac{e_i(t+\Delta t)}{1+e_i(t+\Delta t)} - W_i(t+\Delta t) \right) \Delta \varepsilon_i = \\ &= - \frac{d}{dt} \left( \frac{e_i(t)}{1+e_i(t)} \right) \Delta t - \frac{dW_i(t)}{dt} \Delta t, \\ \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta t} &= - \frac{1}{1 - (1+e_i(t+\Delta t))W_i(t+\Delta t)} \times \\ &\times \left( \frac{1+e_i(t+\Delta t)}{(1+e_i(t))^2} \frac{de_i(t)}{dt} + (1+e_i(t+\Delta t)) \frac{dW_i(t)}{dt} \right), \end{aligned}$$

or (as  $\Delta t \rightarrow 0$ )

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_i}{dt} &= - \frac{1}{1 - (1+e_i(t))W_i(t)} \times \\ &\times \left( \frac{1}{1+e_i(t)} \frac{de_i(t)}{dt} + (1+e_i(t)) \frac{dW_i(t)}{dt} \right). \end{aligned}$$

By inserting the previously derived equality into equation (1), we arrive at

$$\begin{aligned} \frac{dl(t)}{dt} &= \int_{l(t)}^L \frac{1}{1 - (1+e(t,\theta,W))W(z,t)} \times \\ &\times \left( \frac{1}{1+e(t,\theta,W)} \frac{de(t,\theta,W)}{dt} + (1+e(t,\theta,W)) \frac{\partial W(z,t)}{\partial t} \right) dz. \end{aligned} \quad (3)$$

To describe the change in the position of the upper movable boundary of the porous medium considering biodegradation processes and the dependencies  $e = e(t,\theta,W)$  where  $Q$  is the sum of the principal stresses in the porous medium skeleton, we use a kinematic boundary condition. Considering that

$$W(x,t) = \frac{1}{Q_{ws}} m_{ws}(x,t) \quad (4)$$

we obtain

$$\begin{aligned} \frac{dl(t)}{dt} &= \int_{l(t)}^L \frac{1}{1 - (1+e(t,\theta,m_{ws})) \frac{m_{ws}(z,t)}{Q_{ws}}} \times \\ &\times \left( \frac{1}{1+e(t,\theta,m_{ws})} \frac{de(t,\theta,m_{ws})}{dt} + \frac{(1+e(t,\theta,m_{ws}))}{Q_{ws}} \frac{\partial m_{ws}(z,t)}{\partial t} \right) dz. \end{aligned}$$

This condition accounts for non-isothermal conditions, as biodegradation is accompanied by the release of heat, which in turn affects the state of the porous medium. Thus, the kinematic boundary condition allows for the prediction of landfill settlement dynamics, taking into consideration the processes of biodegradation and thermal influence.

### III. MODIFIED FILTRATION CONSOLIDATION EQUATION CONSIDERING BIODEGRADATION

The settlement processes of the surfaces of MSW landfills are determined by two main factors: the consolidation of the porous medium under the influence



of its own weight or external loads, and the reduction of the volume of the organic component due to biodegradation. In this case, the consolidation equation for saturated porous media takes the form of [7, equation (12)].

$$\begin{aligned} \frac{de(t, \theta, m_{ws})}{dt} + e(t, \theta, m_{ws}) \left( \frac{1}{\varrho_p} \frac{d\varrho_p}{dt} - \frac{1}{\varrho_m} \frac{d\varrho_m}{dt} \right) = \\ = (1+e) \frac{\partial}{\partial x} \left( k(e, T) \frac{\partial h}{\partial x} \right), \quad x \in \Omega(t) = (l(t); L), \quad t > 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Here:  $\varrho_m$  – total density of the solid component of the porous medium;  $\varrho_p$  – density of the pore fluid;  $k(e, T)$  – filtration coefficient, which depends on both the temperature  $T$  and the void ratio  $e$ , which in turn may depend on the mass of organic waste  $m_{ws}$  and the sum of principal stresses  $\theta$  in the porous medium skeleton;  $h$  – excess pressure.

The relationship that describes the change in pore pressure in the porous medium requires several assumptions. We assume that changes in stresses in the skeleton of the porous medium and biodegradation processes affect the change in the pore ratio independently. After transitioning to mass for the application of biochemical degradation relationships, the consolidation equation will take the following form:

$$\begin{aligned} \frac{a\gamma}{1+e} \frac{\partial h}{\partial t} - \beta(1+e) \frac{1}{\varrho_{ws}} \frac{\partial m_{ws}}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(e, T) \frac{\partial h}{\partial x} \right), \\ x \in \Omega(t) = (l(t); L), \quad t > 0. \end{aligned} \quad (6)$$

#### IV. MATHEMATICAL MODEL OF SURFACE SETTLEMENT OF THE LANDFILL CONSIDERING BIODEGRADATION

The mathematical model uses a modified filtration consolidation equation supplemented by a kinematic boundary condition for the upper movable boundary of the porous medium.

$$\frac{a\gamma}{1+e} \frac{\partial h}{\partial t} - \beta(1+e) \frac{1}{\varrho_{ws}} \frac{\partial m_{ws}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(e, T) \frac{\partial h}{\partial x} \right), \quad (7)$$

$x \in \Omega(t) = (l(t); L), \quad t > 0,$

$$c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \varrho_c u \frac{\partial T}{\partial x} + Q(x, t, T), \quad (8)$$

$x \in \Omega(t), \quad t > 0,$

$$\frac{\partial m_{ws}(x, t)}{\partial t} = -k_{ws}(T) m_{ws}(x, t), \quad x \in \bar{\Omega}(t), \quad t > 0, \quad (9)$$

$$h(x, t)|_{x=l(t)} = \bar{h}_l(t), \quad t \geq 0, \quad (10)$$

$$T(x, t)|_{x=l(t)} = \bar{T}_l(t), \quad t \geq 0, \quad (11)$$

$$u(x, t)|_{x=L} = \left( -k(e, T) \frac{\partial h}{\partial x} \right) \Big|_{x=L} = 0, \quad t \geq 0, \quad (12)$$

$$\left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=L} = 0, \quad t \geq 0, \quad (13)$$

$$T(x, 0) = T_0(x), \quad x \in \bar{\Omega} = [l_0; L], \quad (14)$$

$$m_{ws}(x, t)|_{t=0} = m_0(x), \quad x \in \bar{\Omega}(t), \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{dl(t)}{dt} = \int_{l(t)}^L \frac{1}{1 - (1+e) \frac{m_{ws}}{\varrho_{ws}}} \times \\ \times \left( \frac{a\gamma}{1+e} \frac{\partial h}{\partial t} + (1-\beta)(1+e) \frac{1}{\varrho_{ws}} \frac{\partial m_{ws}}{\partial t} \right) dz; \\ l(t)|_{t=0} = l_0 < L. \end{aligned} \quad (16)$$

Here:  $h$  – excess head;  $k$  – coefficient of filtration of the porous medium, which depends on temperature  $T$  and porosity coefficient, which, in turn, depends on pressures and concentration of biowaste;  $m_{ws}(x, t)$  – mass fraction of organic component per unit volume of waste;  $n, e = \frac{n}{1-n}$  – porosity and void ratio of the medium;  $k_{ws}$  – biodegradation coefficient, dependent on temperature;  $m_0(x), h_0(x), \bar{h}_l(t), T_0(x), \bar{T}_l(t)$  – known functions;  $c_T$  – volumetric heat capacity of the porous medium;  $\lambda$  – thermal conductivity coefficient of the porous medium;  $\varrho, c_p$  – density and specific heat capacity of the pore fluid;  $Q(x, t, T)$  – function defining heat generation due to biodegradation;  $0 < l_0 < L$  – specified initial position of the upper movable boundary;  $a$  – compression coefficient of the porous medium;  $\gamma$  – specific weight of the pore fluid;  $u$  – filtration velocity.

The paper [8] establishes the existence and uniqueness of a classical solution to the boundary value problem for the filtration consolidation equation with a kinematic boundary condition of type (16).

#### V. RESULTS

In the numerical experiments, we used averaged data, considering the waste storage medium as a two-phase system consisting of pore fluid and the solid phase of the waste itself. It is assumed that the organic waste is uniformly distributed throughout the thickness of the porous medium with an initial total mass of  $m_0 = 300 \frac{\text{kg}}{\text{tone}}$ .

The numerical experiments showed that the settlement of the landfill surface is significantly affected by temperature. The heat released during biodegradation under non-isothermal conditions leads to greater settlement compared to isothermal conditions. Due to the

increase in temperature, after 1000 days, the settlement increased by 7.8%.

TABLE I. SETTLEMENT (IN METERS) IN THE CASE OF AEROBIC BIODEGRADATION PROCESSES

<i>t, days</i>	<i>Neglecting T</i>	<i>Considering T</i>
50	0.072	0.073
100	0.162	0.164
150	0.252	0.255
200	0.342	0.346
300	0.522	0.532
400	0.702	0.720
500	0.882	0.912
600	1.062	1.107
700	1.242	1.305
800	1.422	1.507
900	1.602	1.712
1000	1.782	1.921

Under high-temperature conditions (up to 83 °C), biodegradation processes are slowed down due to the reduced biological activity of microorganisms. The results showed that methane production increases in aerobic processes at high temperatures, exceeding the predicted values for isothermal conditions by more than two times.

TABLE II. PRODUCTION DURING AEROBIC BIODEGRADATION

<i>t, days</i>	<i>neglecting T</i>	<i>considering T</i>
50	39.34	13.82
100	77.83	51.13
150	115.47	89.55
200	152.29	107.43
300	223.53	134.12
400	291.69	156.49
500	356.90	176.59
600	419.29	195.12
700	478.98	212.43
800	536.10	228.73
900	590.74	244.16
1000	643.01	258.84

TABLE III. PRODUCTION DURING ANAEROBIC BIODEGRADATION

<i>t, days</i>	<i>neglecting T</i>	<i>considering T</i>
50	39.34	7.15
100	77.83	19.68
150	115.47	36.66
200	152.29	58.43
300	223.53	119.92
400	291.69	213.24
500	356.90	339.37
600	419.29	464.84
700	478.98	551.25
800	536.10	617.39
900	590.74	672.89
1000	643.01	721.648

VI. CONCLUSIONS

This work examined the settlement of the surface of MSW landfills, considering the filtration consolidation of porous media. The model allows for the evaluation of the stress-strain state of the landfill without accounting for microbiological activity, while taking into consideration biodegradation and thermal processes.

During the numerical experiments, it was found that accounting for non-isothermal conditions changes the dynamics of surface settlement in the landfill. Thermal processes can lead to both increases and decreases in the predicted settlement values. The results showed that under aerobic conditions, the intensity of biodegradation of organic residues is reduced, and as a result, the settlement of the landfill occurs more slowly than under anaerobic conditions.

The conducted numerical experiments confirm the feasibility of using a mathematical model to predict the settlement of MSW landfills. Considering biodegradation processes allows for the prediction of settlement dynamics and enables the use of calculation data for the design and operation of these facilities.

REFERENCES

- [1] Y. Ren, Z. Zhang., M. Huang, “A review on settlement models of municipal solid waste landfills”, Waste Management, volume 149, 2022, pp. 79-95. doi: 10.1016/j.wasman.2022.06.019.
- [2] M. S. Mousavi, J. Eun, “A Predictive Settlement Modeling Framework Employing Thermal–Hydraulic–Mechanical–Biochemical Processes in Municipal Solid Waste Landfills”, International Journal of Geomechanics, volume 23, Issue 6, 04023075, 2023. doi: 10.1061/IJGNALGMENG-8115
- [3] P. M. Martyniuk, N. V. Ivanchuk, “Effect of the Microorganisms Dynamics on the Base Subsidence of the Solid Household Waste Storage During Consolidation”, Journal of Engineering Sciences (Ukraine), 11(1), H21–H28, 2024.
- [4] Q. Liu, Y. Deng, T. Wang, “One-dimensional nonlinear consolidation theory for soft ground considering secondary consolidation and the thermal effect”, Computers and Geotechnics, volume 104, pp. 22-28, 2018. doi: 10.1016/j.compgeo.2018.08.007.
- [5] O.Stepanchenko, L. Shostak, V. Moshynskiy, O.Kozhushko, P. Martyniuk, “Simulating Soil Organic Carbon Turnover with a Layered Model and Improved Moisture and Temperature Impacts”, Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 149, pp. 74–91, 2023.
- [6] X. Liu, J. Shi., X. Qian, Y. Hu, G. Peng, “One-dimensional model for municipal solid waste (MSW) settlement considering coupled mechanical-hydraulic-gaseous effect and concise calculation”, Waste Management, volume 31, Issue 12, 2473-2483, 2011. doi: 10.1016/j.wasman.2011.07.013.
- [7] V. A. Herus, P. M. Martyniuk, “Generalization of the soil consolidation equation considering the effects of physicochemical factors”, Bulletin of Kharkiv National University named after V. N. Karazin. Series: Mathematical Modeling. Information Technologies. Automated Control Systems, Issue 27, pp. 41–52, 2015.
- [8] P. Martyniuk, O. Ostapchuk, T. Tsvietkova, O. Michuta, “Existence and uniqueness of solving boundary problem for quasi-linear parabolic equation with integral condition on free boundary”, JP Journal of Heat and Mass Transfer, 15(3), pp. 569–578, 2018.

# Integrating CNN-BiLSTM Architecture for Predicting Precipitation and Meteorological Patterns

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.084>

Thea Camille-Maxime

National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
c.m.thea@nuwm.edu.ua

Olena Belozeroва

National University of Water and Environmental  
Engineering  
Rivne, Ukraine  
ol.d.kozhushko@nuwm.edu.ua

**Abstract** – Accurate forecasting of precipitation is essential for various sectors, including agriculture, disaster management, and water resource planning. This paper presents a deep learning architecture that combines Convolutional Neural Networks (CNN) and Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) layers to predict precipitation using a set of weather parameters, including temperature, station level pressure, dew point, and calculated relative humidity. The proposed architecture leverages CNN for feature extraction and BiLSTM for capturing temporal dependencies, offering insights into the model's efficiency and the challenges associated with predicting precipitation using calculated inputs.

**Keywords** – meteorology data, weather forecasting, convolutional neural network, LSTM.

## I. INTRODUCTION

Forecasting precipitation is a complex task due to the chaotic nature of weather systems and the multitude of influencing factors. Accurate short-term predictions of precipitation events like rain or snow are vital for decision-making in agriculture, transportation, and disaster preparedness [1]. Traditional numerical weather prediction models often struggle with fine-scale phenomena, prompting the exploration of machine-learning techniques that learn from historical data patterns [2].

Previous studies have demonstrated the effectiveness of CNN-LSTM architectures in predicting continuous variables such as temperature and wind speed. In our earlier work [3], we successfully applied a CNN-BiLSTM model for gap-filling in temperature time series data, addressing the issue of missing meteorological measurements. However, predicting a binary precipitation event using similar techniques poses significant challenges. Furthermore, precipitation quantities should be adequately estimated for rainy days.

This paper aims to analyze a CNN-BiLSTM model architecture explicitly designed to predict precipitation using weather parameters, including calculated relative humidity. We focus on the roles of custom functions for binary outputs, the integration of CNN and BiLSTM layers, preprocessing steps such as scaling and transformation, and the challenges involved in handling calculated inputs and binary targets.

## II. MATERIALS AND METHODS

### A. Calculation of Relative Humidity

Since relative humidity is a critical parameter for predicting precipitation but is not directly available in our data, we calculate it from temperature and dew point temperature using a formula derived from the Clausius-Clapeyron equation [4]:

$$RH = 100 \times \exp\left(\frac{17.625 \times T_d}{243.04 + T_d} - \frac{17.625 \times T}{243.04 + T}\right).$$

### B. Data acquisition and preprocessing

Daily weather records for model training and validation are sourced from the NCDC Climate Data Online – an open data service that aggregates historical records from thousands of weather stations across the world [5]. We selected Ukrainian stations with the least missing data frequency for analysis: Zhuliany, Rivne, Poltava, Vinnytsya, and Sumy. Downloaded meteorology records for 2014 – 2024 from these stations were separated into train and test datasets by 70:30 rule.

Min-Max feature scaling is applied to quantitative meteorology variables: average daily temperature, relative humidity, air pressure, precipitation quantities. For the binary target variable (precipitation events), we apply a logarithmic transformation using the natural logarithm of one plus the value to handle skewness in the data distribution:

$$X_{transformed} = \log(1 + X).$$

### C. Model Architecture

The proposed model is designed to predict precipitation using multiple weather parameters as input features. Its architecture is schematically visualized in Figure 1.

Each weather parameter, namely temperature, dew point, station level pressure, and relative humidity, has its input layer corresponding to the historical sequence length. Each input feature is processed through its convolutional layer, applying filters to extract local temporal patterns. After convolution, MaxPooling layers reduce dimensionality by selecting the maximum value

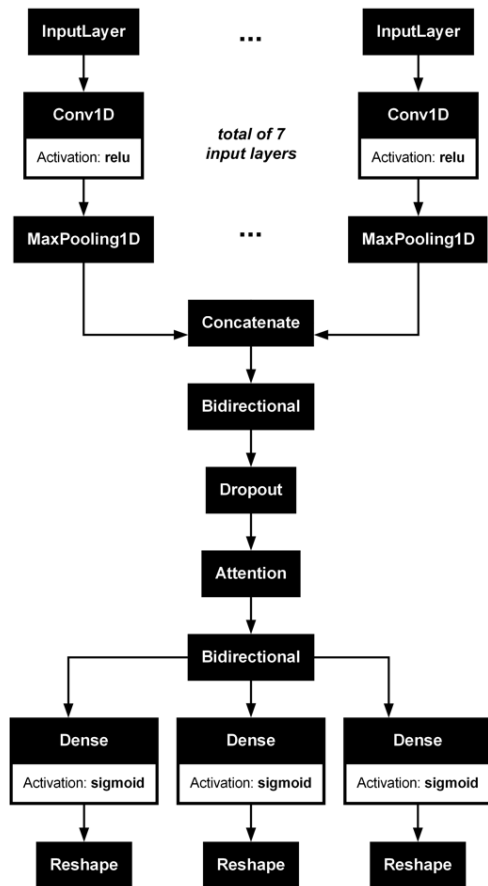


Figure 1. Architecture of the CNN-BiLSTM model

within a pooling window, summarizing the most prominent features.

Outputs from the feature-specific convolutional and pooling layers are concatenated to combine the extracted features from all inputs, forming a unified representation. The merged features are then passed through two Bidirectional LSTM layers, which process the data forward and backward to capture temporal dependencies. The BiLSTM captures information from past and future contexts by processing sequences in both directions. An attention layer is applied to focus on relevant time steps within the sequence, allowing the model to weigh the importance of different time steps when making predictions [6]. We also add dropout layers that randomly set a fraction of input units to zero during training after the LSTM and attention layers to prevent overfitting.

The network has three output layers for predicted parameters: binary rain and snow events, and precipitation quantity. A custom output layer is applied for the binary targets using a sigmoid activation function to output probabilities between 0 and 1:

$$\hat{y} = \sigma(W_{out} \cdot h + b_{out}),$$

where  $\sigma$  is the sigmoid function,  $W_{out}$  and  $b_{out}$  are the weights and biases, and  $h$  is the output from the previous layer [7].

Handling binary targets like precipitation events requires specialized activation functions and loss functions. The sigmoid activation function maps the output to a range between 0 and 1, suitable for

representing probabilities. The binary cross-entropy loss function measures the discrepancy between the predicted probabilities and the actual binary labels:

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i)],$$

where  $y_i$  is the true label,  $\hat{y}_i$  is the predicted probability, and  $N$  is the number of samples.

#### D. Training the Model

The model is trained using binary cross entropy loss function, which encourages the model to output probabilities close to the true labels. An adaptive optimizer like Adam is used with a learning rate of  $\alpha = 0.0001$  and gradient clipping with a norm threshold of 1 to prevent exploding gradients.

While binary cross-entropy is used as the loss function during training, we evaluate the model's performance using Mean Squared Error (MSE) and Huber loss to measure the regression aspects of the predictions, especially when dealing with continuous representations or probabilities. The Huber loss combines the best properties of MSE and Mean Absolute Error (MAE), quadratic for minor and linear for significant errors, thus being more robust to outliers.

It should be noted that precipitation events are significantly less frequent compared to dry day events for temperate continental climate. This leads to class imbalance that can bias the model toward predicting the majority class. The proposed model currently does not address this issue; however, the recommended strategy in this case would be to oversample the minority class using Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) [2] or other similar approaches.

### III. RESULTS AND DISCUSSION

From the validation data set, 40 intervals are selected randomly, and the precipitation forecast for 31 days ahead is made. The calculated series are concatenated and evaluated with the following metrics: mean absolute error (MAE), root mean squared error (RMSE) and  $R^2$  score. Table 1 presents the results for these validation metrics.

In the parameters column, 'prec q' stands for precipitation quantity, in mm, and 'rain' and 'snow' for probability of rain and snow events, respectively. For the event probabilities, only the days with significant (above 0.01 mm) precipitation quantities are considered.

The results demonstrate that our model achieves satisfactory accuracy in predicting precipitation and high accuracy in predicting rain and snow events across different locations. The validation metric values for rain and snow are particularly optimistic; however, due to filtering out predicted dry days from validation, these only account for type I classification error.

TABLE I. RESULTING VALIDATION METRICS FOR SELECTED STATIONS.

Station	Parameter	MAE	RMSE	R <sup>2</sup> score
Zhuliany	<i>precip q</i>	1.13	2.57	0.615
	<i>rain</i>	0.048	0.150	0.980
	<i>snow</i>	0.041	0.128	0.963
Rivne	<i>precip q</i>	1.04	2.19	0.505
	<i>rain</i>	0.036	0.066	0.995
	<i>snow</i>	0.019	0.030	0.996
Poltava	<i>precip q</i>	0.98	2.20	0.575
	<i>rain</i>	0.031	0.085	0.985
	<i>snow</i>	0.027	0.045	0.999
Vinnytsia	<i>precip q</i>	0.93	2.22	0.128
	<i>rain</i>	0.077	0.133	0.910
	<i>snow</i>	0.089	0.133	0.807
Sumy	<i>precip q</i>	1.00	2.16	0.420
	<i>rain</i>	0.023	0.043	0.999
	<i>snow</i>	0.039	0.105	0.973
Average	<i>precip q</i>	1.02	2.27	0.449
	<i>rain</i>	0.043	0.095	0.974
	<i>snow</i>	0.043	0.088	0.948

For precipitation prediction, the average MAR and RMSE are around 1 and 2.27 mm, which is a relatively low error for precipitation quantity. However, the R2 scores vary among stations, ranging from 0.128 in Vinnytsia to 0.615 in Zhuliany. While the model performs well in most cases, the lower R2 values in some of the cases indicate that the quality of prediction has certain issues and can further be improved.

Comparing these findings with our previous study on temperature gap-filling, the model demonstrates robust performance across different meteorological variables. The ability to effectively predict multiple binary targets highlights the versatility of the CNN-BiLSTM architecture.

#### IV. CONCLUSION

This study presents a CNN-BiLSTM model architecture for predicting precipitation using calculated relative humidity and other meteorological parameters. The model leverages feature-specific convolutional layers to extract local temporal patterns, BiLSTM layers

to capture long-term dependencies, and an attention mechanism to focus on relevant time steps. Preprocessing steps, including calculating relative humidity and scaling strategies, are critical for model performance. The model achieves high accuracy, as evidenced by the low MAE and RMSE values in predicting precipitation, rain, and snow.

Our findings demonstrate that the proposed architecture effectively handles mixed data types and calculated inputs, making it a valuable tool for meteorological forecasting. This approach contributes to advancing machine learning applications in meteorology, offering a framework that can be adapted and extended for various predictive tasks.

Future work will incorporate additional parameters such as wind speed, atmospheric pressure changes, and cloud cover to enhance prediction accuracy further. We also plan to apply the model to different geographical regions and fine-tune it with local data through transfer learning. Experimenting with alternative architectures like transformer-based models or other attention mechanisms may yield further improvements.

#### V. REFERENCES

- [1] P. Bauer, A. Thorpe, and G. Brunet, "The quiet revolution of numerical weather prediction," *Nature*, vol. 525, no. 7567, pp. 47–55, 2015.
- [2] N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O Hall, and W. P Kegelmeyer, "SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 16, pp. 321–357, 2002.
- [3] C.-M. Thea and O. Belozerova, "Filling gaps in daily temperature data with a CNN-LSTM model," *Proceedings of the International Scientific Conference Information Technologies and Computer Modelling 2024*, May 2024.
- [4] M. G. Lawrence, "The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 86, no. 2, pp. 225-235, 2005.
- [5] National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration. "Climate Data Online (CDO) provides free access to NCDC's archive of global historical weather and climate data in addition to station history information". NOAA.gov. <https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/> (retrieved October 5, 2024).
- [6] S. Sakib, M. K. Mahadi, S. R. Abir et al., "Attention-Based Models for Multivariate Time Series Forecasting: Multi-step Solar Irradiation Prediction," *Heliyon*, vol. 10, no. 6, e27795, 2024.
- [7] Y. Qin, D. J. Song, H. F. Chen et al., "A Dual-Stage Attention-Based Recurrent Neural Network for Time Series Prediction," in *Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'17)*, AAAI Press, pp. 2627–2633, 2017.



# Математична модель очищення забрудненого розчину і пом'якшення води з врахуванням експериментальних даних на границі фільтра

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.085>

Юрій Білушак

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](mailto: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  
[zalznuchna6@gmail.com](mailto:zalznuchna6@gmail.com)

Анастасія Чучвара

Відділ числових методів математичної фізики  
Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАНУ  
Львів, Україна  
[davydoka@gmail.com](mailto:davydoka@gmail.com)

**Abstract** — Побудовано математичну модель, яка описує процеси перенесення забруднюючих речовин водним поровим розчином через засипний фільтр, що супроводжуються хімічною реакцією пом'якшення води. При цьому відомі експериментальні дані щодо концентрації домішкової речовини на нижній границі тіла. Для кожної з компонент системи отримано рівняння масоперенесення, на основі яких сформульовано крайову задачу конвективної дифузії, що супроводжується хімічною реакцією. Запропоновано модельний опис хімічної реакції пом'якшення води на прикладі взаємодії двох речовин із різними стехіометричними коефіцієнтами.

**Ключові слова** — математична модель, фільтр води, конвективна дифузія, сорбція, пом'якшення води, хімічна реакція, крайова задача, числовий аналіз.

## I. ВСТУП

Перевищення допустимої кількості розчинених у воді речовин можуть призводити до корозії або накопичення осаду на елементах водопровідної системи, сприяти утворенню накипу на побутових приладах, що призводить до зменшення теплопровідності нагрівних елементів, а відтак до збільшення обсягів використання електроенергії [4]. Тому актуальною є проблема очищення води та покращення її якості, як з метою зменшення негативного впливу на здоров'я, так і зменшення непрямих економічних витрат.

Для очищення природних та забруднених вод до стану питної використовуються різні типи фільтрів: механічні, хімічні, фізико-хімічні, електричні, біологічні, тощо [1]. Кожен з цих типів фільтрів є ефективним для певного виду забруднення. Наприклад, такі

домішки як органічні речовини, іони металів з низькими степенями окислення і бактерії можна ефективно знешкоджуються методами хімічної очистки води.

До хімічних методів очищення забруднених вод належить нейтралізація кислот і окиснення мінеральних сполук [6]. В якості лугувальних речовин найчастіше використовують розчини каустичної  $NaOH$  або харчової соди  $Na_2HCO_3$ . Як окислювачі зазвичай застосовують розчини слабких органічних кислот, наприклад, лимонної чи оцтової кислоти або слабкий розчин мінеральної кислоти, наприклад, сірчаної.

Механічні фільтри, робота яких базується на процесах сорбції, видаляють з води важкі метали, хлороорганічні речовини (хлороформ, чотирихлористий вуглець, бромдихлорметан та інші речовини), тощо [8].

Робота присвячена побудові математичної моделі, яка описує процеси перенесення забруднюючих речовин водним поровим розчином через засипний фільтр, що супроводжуються хімічною реакцією пом'якшення води за наявності експериментальних даних на одній з границь тіла.

## II. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

При формулюванні вихідних співвідношень моделі перенесенні забруднення у засипному фільтрі води вважаємо, що довільна інфінітесимально мала область тіла складається зі скелета та водного розчину, який заповнює поровий простір. Прийmemo, що в процесі фільтрації скелет не деформується, і пористість залишається постійною (не враховуються

зміни пов'язані із сорбцією домішкової речовини). Водний розчин є багатокомпонентним і складається з частинок води, забруднюючих частинок типу важких металів і солей кальцію або магнію. Частинки забруднення знаходяться у двох станах – у конвективно рухомому розчині і на поверхні скелету. На поверхню тіла подається реагент, який спричинює хімічну реакцію типу (1) або (2). В результаті такої реакції утворюються частинки солей кальцію або магнію, води та газу, який миттєво випаровується. Речовини, що залишилися після реакції мігрують з водним розчином.

Рівняння балансу для  $j$  компоненти порового розчину запишемо у вигляді [2]

$$\rho \frac{dC_j(\tau, \xi)}{d\tau} = -\vec{v} \cdot \vec{J}_j + \sigma_{mj}, \quad j = 1, \dots, 7, \quad (1)$$

де  $\rho$  – сумарна густина розчину;  $C_j(\tau, \xi)$  – масова концентрація компоненти  $j$ ;  $\vec{J}_j$  – дифузійний потік  $j$ -ї складової;  $\sigma_{mj}$  – потужність виробництва маси компоненти  $j$  ( $\sigma_{m0} = 0$ );  $d/d\tau = \partial/\partial\tau + \mathbf{v} \cdot \vec{\nabla}$  – повна похідна за часом.

Частинкам, які утворюють основу тіла, відповідає індекс  $j = 0$ , частинкам водного розчину –  $j = 1$ , домішковим частинкам забруднюючої речовини у конвективно рухомому розчині –  $j = 2$  і у зв'язаному стані –  $j = 3$ , сполуці одного з основних катіонів –  $j = 4$ , частинкам реагента –  $j = 5$ , частинки солей кальцію або магнію, які утворилися в наслідок хімічної реакції –  $j = 6$  та молекулам газу, які миттєво випаровуються – індекс  $j = 7$ .

Дифузійний потік визначається градієнтами хімічних потенціалів, які лінійно залежать від концентрацій

$$\vec{J}_j = -L_j \vec{\nabla} C_j(\tau, \xi), \quad j = 1, \dots, 7, \quad (2)$$

де  $L_j$  – кінетичний коефіцієнт перенесення  $j$ -ї складової.

Джерелом (стоком) маси компонент  $j = 2, 3$  є процеси сорбції-десорбції частинок, а компонент  $j = 1, 4-7$  – хімічна реакція у вигляді локальних внутрішніх перетворень [5], які розглядаємо як перерозподіл внутрішніх степенів свободи молекул у будь-якій точці континууму [7].

Потужності виробництва маси компонент  $j = 2, 3$  (компонент, які приймають участь в процесах сорбції-десорбції) є пропорційними до локальної різниці хімічних потенціалів і, як наслідок, різниці концентрацій  $C_j(\tau, \xi)$ :

$$\sigma_{mj} = -k_j C_j(\tau, \xi) \quad (j = 2, 3), \quad (3)$$

де  $k_2, k_3$  – кінетичні коефіцієнти процесів сорбції і десорбції відповідно.

Потужності виробництва маси компонент, які приймають участь у хімічній реакції, є [5]

$$\sigma_{mj} = \nu_j J \quad (j = 1, 4, \dots, 7). \quad (4)$$

де  $\nu_j = \frac{\nu_j^c M_j}{\sum_{j=1,4,6,7} \nu_j^c M_j}$  і в знаменнику сумування від-

бувається за тими компонентами, які є продуктом хімічної реакції [5], тут  $\nu_j^c$  – стехіометричний коефіцієнт  $j$ -ї компоненти, при чому  $\sum_{j=1,4,6,7} \nu_j^c = 0$  [3];

$M_j$  – молекулярна маса  $j$ -ї компоненти,  $J$  – швидкість хімічної реакції, віднесеної до одиниці об'єму  $\Delta V$ :

$$J = \sum_{j=1,4,6,7} \frac{1}{\nu_j} \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{\Delta M_j}{\Delta V} \right),$$

Звідки в граничному випадку  $\Delta V \rightarrow 0$  і з врахуванням означення густини  $j$ -го компонента

$\rho_j(\tau, \xi) = \frac{dM_j}{dV}$  ( $j = 0, \dots, 7$ ), отримаємо локальну швидкість хімічної реакції

$$J = \sum_{j=1,4,6,7} \frac{1}{\nu_j} \frac{\partial \rho_j}{\partial \tau}.$$

Враховуючи, що  $\rho_j = C_j \rho$ , де  $C_j = \rho_j / \rho$  – масові концентрації компонент, маємо

$$J = \sum_{j=1,4,6,7} \frac{\rho}{\nu_j} \frac{\partial C_j}{\partial \tau}. \quad (5)$$

Концентрації  $C_j(\tau, \xi)$  та потоки  $\vec{J}_j$  ( $j = 0, \dots, 7$ ) задовольняють умови нормування  $\sum_j C_j(\tau, \xi) = 1$  і

$\sum_j \vec{J}_j = 0$ . Густина  $\rho$  і кінетичні коефіцієнти  $L_j, k_j$ , також  $\nu_j$  вважаємо сталими. Крім цього вважаємо, що всі швидкості конвективного перенесення  $\vec{v}_j$  є рівні між собою і дорівнюють швидкості конвективного перенесення водного розчину:  $\vec{v}_j = \vec{v}_1 = \vec{v}$  ( $j = 2, 4, 5, 6$ ).

Вважаємо, що газ який утворився внаслідок хімічної реакції є неконденсованим і нерозчинним, він утворює бульбашки газу для яких діють закони ідеального газу. Приймаємо, що бульбашки газу після утворення миттєво вилучаються з водного розчину. Густина такого газу підпорядковується закону ідеального газу

$$\rho_{газы} = \rho_7 = \frac{p}{RT}, \quad (6)$$

де  $T$  – температура рідини,  $p$  – тиск,  $R$  – універсальна газова стала. Враховуючи (6) зміна концентрації миттєво вилученого газу рівна нулю.

Тоді концентрації  $C_j(\tau, \xi)$  визначаємо з рівнянь:

Рівняння масоперенесення домішкових частинок, які сорбуються-десорбуються, у станах  $j = 2, 3$

$$\frac{\partial C_2(\tau, \xi)}{\partial \tau} = D_2 \Delta_{\xi} C_2(\tau, \xi) - \bar{v} \cdot \nabla_{\xi} C_2(\tau, \xi) - k_2 C_2(\tau, \xi) + k_3 C_3(\tau, \xi); \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_3(\tau, \xi)}{\partial \tau} = D_3 \Delta_{\xi} C_3(\tau, \xi) + k_2 C_2(\tau, \xi) - k_3 C_3(\tau, \xi). \quad (10)$$

Рівняння масоперенесення сполуки одного з основних катіонів ( $j = 4$ ) і реагента ( $j = 5$ ), що вступають у хімічну реакцію

$$\frac{\partial C_4(\tau, \xi)}{\partial \tau} = D_4 \Delta_{\xi} C_4(\tau, \xi) - \bar{v} \cdot \nabla_{\xi} C_4(\tau, \xi) - \nu_4 \sum_{j=1,4,\dots,7} \frac{\rho}{\nu_j} \frac{\partial C_j(\tau, \xi)}{\partial \tau}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_5(\tau, \xi)}{\partial \tau} = D_5 \Delta_{\xi} C_5(\tau, \xi) - \bar{v} \cdot \nabla_{\xi} C_5(\tau, \xi) - \nu_5 \sum_{j=1,4,\dots,7} \frac{\rho}{\nu_j} \frac{\partial C_j(\tau, \xi)}{\partial \tau}. \quad (10)$$

Рівняння масоперенесення частинок нерозчинної речовини, що утворилися в наслідок хімічної реакції ( $j = 6$ )

$$\frac{\partial C_6(\tau, \xi)}{\partial \tau} = D_6 \Delta_{\xi} C_6(\tau, \xi) - \bar{v} \cdot \nabla_{\xi} C_6(\tau, \xi) + \nu_6 \sum_{j=1,4,\dots,7} \frac{\rho}{\nu_j} \frac{\partial C_j(\tau, \xi)}{\partial \tau}. \quad (11)$$

Рівняння перенесення частинок води

$$\frac{\partial C_1(\tau, \xi)}{\partial \tau} = D_1 \Delta_{\xi} C_1(\tau, \xi) - \bar{v} \cdot \nabla_{\xi} C_1(\tau, \xi) + \nu_1 \sum_{j=1,4,\dots,7} \frac{\rho}{\nu_j} \frac{\partial C_j(\tau, \xi)}{\partial \tau}. \quad (12)$$

Тут  $D_j = L_j / \rho$  – коефіцієнт дифузії  $j$ -ї компоненти.

Всі отримані рівняння масоперенесення для  $j = 1, \dots, 7$  супроводжуються співвідношенням для концентрації скелету

$$C_0 = 1 - \sum_{j=1}^7 C_j. \quad (13)$$

### III. МОДЕЛЬНИЙ ОПИС ХІМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ ПОМ'ЯКШЕННЯ ВОДИ

Ми розглядаємо випадок коли для пом'якшення води на поверхню фільтра подається реагент, який спричинює, наприклад хімічну реакцію (1), що описується співвідношеннями (4)-(6). На рис. 1 показана схема хімічної взаємодії двох речовин з стехіометричними коефіцієнтами  $\nu_4$  та  $\nu_5$ . Для того щоби повністю прореагував діоксид кальцію  $CaO_2$  необхідно додати оцтову кислоту  $CH_3COOH$  у співвідношенні 9 до 4 (варіант 1 на рис. 2). Для цього випадку стехіометричні коефіцієнти позначимо верхнім індексом "c". Тоді  $\nu_1^c = 6$  – стехіометричний коефіцієнт води,  $\nu_4^c = 4$  – стехіометричний коефіцієнт катіону,  $\nu_5^c = 9$  – стехіометричний коефіцієнт реагенту,  $\nu_6^c = 4$  – стехіометричний коефіцієнт осаду,  $\nu_7^c = 2$  – стехіометричний коефіцієнт газу. В результаті такої хімічної реакції отримаємо речовини з коефіцієнтами  $\nu_1^c$ ,  $\nu_6^c$ ,  $\nu_7^c$ , масоперенесення яких описується рівняннями

$$(1 - a_{66}) \frac{\partial C_6(t, x)}{\partial t} = d_6 \frac{\partial^2 C_6(t, x)}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_6(t, x)}{\partial x} + \sum_{j=1,4,5,7} a_{6j} \frac{\partial C_j(t, x)}{\partial t}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial C_7(t, x)}{\partial t} = 0; \quad (15)$$

$$(1 - a_{11}) \frac{\partial C_1(t, x)}{\partial t} = d_1 \frac{\partial^2 C_1(t, x)}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_1(t, x)}{\partial x} + \sum_{j=4,5,6,7} a_{1j} \frac{\partial C_j(t, x)}{\partial t}, \quad (16)$$

де  $a_{kj} = \bar{v}_k \rho / \nu_j$  ( $k, j = 1, 4, 5, 6$ ).

Тоді система рівнянь моделі включає співвідношення (7), (8), (14)-(16).

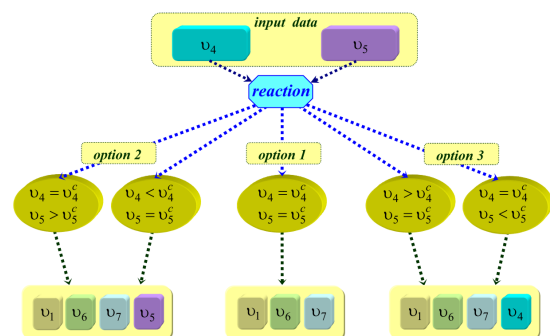


Рисунок 1. Схема хімічної реакції двох речовин з коефіцієнтами  $\nu_4$  та  $\nu_5$

Якщо на верхню поверхню подано більшу кількість реагенту ніж необхідно для проходження повної реакції (варіант 2 на рис. 1), то в результаті отримаємо речовини з коефіцієнтами  $\nu_1, \nu_5, \nu_6, \nu_7$ . В цьому випадку система рівнянь моделі складається з рівнянь (7), (8), (10), (14)-(16).

Якщо на верхню поверхню подано меншу кількість реагенту ніж необхідно для проходження повної реакції (варіант 3 на рис. 1), то в результаті отримаємо речовини з коефіцієнтами  $\nu_1, \nu_4, \nu_6, \nu_7$ . В цьому випадку система рівнянь моделі складається з рівнянь (7)-(9), (14)-(16).

Для концентрацій  $C_4(t, x)$ ,  $C_5(t, x)$  та  $C_6(t, x)$  характерна наступна закономірність: скільки лишилося речовини після хімічної реакції на поверхні  $x = 0$ , стільки промігрувало через шар і вийшло на поверхню  $x = x_0$ .

Значимо, що у варіантах 2 і 3 рівності  $\nu_j = \nu_j^c$  є максимальними значеннями величин  $\nu_j$ , за яких справджуються відповідні результати хімічної реакції.

Сформульовано крайову задачу для шару, через який відбувається фільтрування водного розчину, де на поверхню тіла рівномірно подається реагент. В початковий момент часу механічний фільтр є чистим і заповнений водою, яка характеризується сталою підвищеною твердістю.

Граничні та початкові умови на шукані функції сформульовані у відповідності із фізичними та хімічними процесами, які відбуваються на поверхнях фільтра. При цьому прийнято, що на нижній границі фільтра відомо або можна виміряти значення функції концентрації важких металів у водному розчині в певні моменти часу. Такі експериментальні дані апроксимуються поліномом заданої степені.

Крайові задачі розв'язані за допомогою інтегральних перетворень та отримані відповідні розрахункові формули.

#### IV. ПАКЕТ ПРОГРАМ “WODFIL”

На основі отриманих розв'язків для оцінки процесів очищення та пом'якшення води засипним фільтром води ми розробили пакет програм “WodFil”.

Точність обчислення рядів становила  $10^{-6}$ .

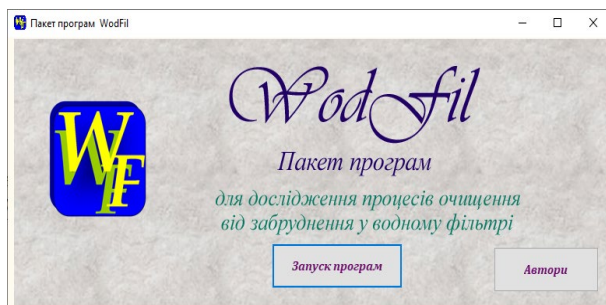


Рисунок 2. Головне вікно пакету “WodFil”

Проведено числовий аналіз функцій концентрації забруднюючих частинок, які мігрують у водному розчині, та концентрації частинок, сорбованих на скелеті фільтра. Числові розрахунки проведені для двох наборів експериментальних даних – для якісного очищення води та менш якісного. На їх основі побудовані апроксимаційні поліноми 5-ї степені, які використані як гранична умова для функції концентрації частинок забруднення у водному розчині на нижній поверхні фільтра. Обчислення проведені у природних безрозмірних змінних.

Характерні розподіли концентрації забруднення у водному розчині в різні моменти часу продемонстровані для якісного фільтра на рис. 3, а для не якісного – на рис. 4. Тут рис. a наведені для малої швидкості конвективного перенесення, а рис. b - для великої. Криві 1-7 відповідають  $t = 0.001, 0.01, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.72$ .

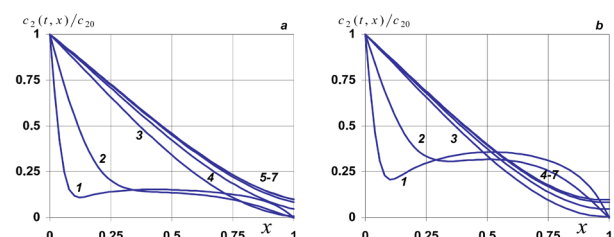


Рисунок 3. Концентрація частинок забруднення, які переносяться поровим розчином, в різні моменти часу  $t$  для  $v = 0.8$  (рис. a) та  $v = 1.5$  (рис. b) для якісного фільтра

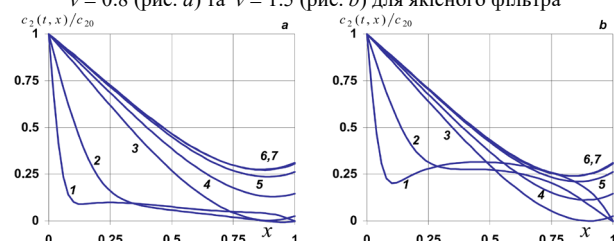


Рисунок 4. Концентрація частинок забруднення, які переносяться поровим розчином, в різні моменти часу  $t$  для  $v = 0.8$  (рис. a) та  $v = 1.5$  (рис. b) для неякісного фільтра

Для малих швидкостей конвективного перенесення з часом концентрація у водному розчині збільшується (рис. 3a) доки не вийде на усталений режим. Для великих швидкостей в першій половині шару з ростом часу концентрація зростає, проте існує точка перетину за якою значення концентрації починають спадати ((криві 1-2, рис 4b)). З подальшим збільшенням часу протікання процесу фільтрації цей локальний максимум нівелюється і розподіли концентрації стають монотонно спадними.

#### V. ВИСНОВКИ

Визначено закономірності зазначених процесів, встановлено вплив коефіцієнта швидкості конвективного перенесення та товщини фільтра на концентрацію частинок забруднення, що мігрують з розчином, і концентрації сорбованої речовини. Показано, що для малих швидкостей конвективного перенесення з часом концентрація у водному розчині збільшується доки не вийде на усталений режим. Для більших значень цього коефіцієнта

спостерігається наявність часового інтервалу, коли величина швидкості конвективного перенесення практично не впливає на поведінку і значення концентрації забруднення у розчині. Причому чим якісніша робота фільтра, тим такий інтервал настає раніше.

Для малих часів практично не відчутний вплив заданих експериментальних даних як для якісної, так і не дуже якісної роботи фільтра, і значення відповідних концентрацій практично співпадають. На решті часовому проміжку значення концентрації частинок у розчині для випадку якісного фільтра завжди менші ніж для не дуже якісного.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Словник-довідник з екології : навч.-метод. посіб. / уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. — Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2013. — С. 188.
- [2] Чапля С.Я., Чернуха О.Ю. Математичне моделювання дифузійних процесів у випадкових і регулярних структурах. — Київ: Наук. думка, 2009. — 302 с.
- [3] De Groot, S.R.. Thermodynamics of irreversible processes, von S. R. de Groot. North-Holland Publishing Comp., Amsterdam, 1966. — 242
- [4] Dobersek D., Goricanec D. Evaluation of Thermal Flow Losses and Increased Consumption of Electricity due to Water Scale Precipitation on Heaters of Domestic Appliances. 5th WSEAS Int. Conf. on Heat and Mass transfer (HMT'08), Acapulco, Mexico. — 2008. - P.127\_131
- [5] Gyarmati I. Non-equilibrium Thermodynamics. Field Theory and Variational Principles. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1970. — 184p.
- [6] Jalvo B., Aguilar-Sanchez A., Ruiz-Caldas M.X., Mathew A.P. Water filtration membranes based on non-woven cellulose fabrics: Effect of nanopolysaccharide coatings on selective particle rejection, antifouling, and antibacterial properties. Nanomaterials. - 2021. — Vol. 11(7). —P. 1752.
- [7] Prigogine I. Mazur P. Sur l'extension de la thermodynamique aux phénomènes irréversibles liés aux degrés de liberté internes. Physica. — 1953. — Vol. 19. — P. 241-254.
- [8] Van der Bruggen B. Sustainable implementation of innovative technologies for water purification. Nature Reviews Chemistry. - 2021. Vol.5(4), P. 217-218.



# Модифікація задачі Д. Гільберта при моделюванні процесів повільного руху рідин з перетоками

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.086>

Андрій Бомба

Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[abomba@ukr.net](mailto:abomba@ukr.net)

Олекса Кушнір

Національний університет водного господарства та природокористування Рівне, Україна  
[ol.o.kushnir@nuwm.edu.ua](mailto:ol.o.kushnir@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – Дослідження присвячено узагальненню числового методу комплексного аналізу моделювання процесів повільного руху води в водоймах, обмежених лініями втоку, витоку та береговими непроникними лініями. При цьому розглядаються різні варіанти формування течії в залежності від величин керуючих параметрів (граничних потенціалів, витрат тощо).

**Ключові слова** – математичне моделювання; повільний рух води; метод комплексного аналізу.

## 1. ЗАГАЛЬНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Ще на початку минулого століття такі вчені, як Давид Гільберт (див., напр., [1]-[3]) ставили та розв'язували задачі про знаходження в деякій області  $G_z$  аналітичної функції (комплексного потенціалу)  $\omega = \omega(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)$ , де  $\varphi = \varphi(x, y)$ ,  $\psi = \psi(x, y)$  – відповідно потенціал, та функція течії, на ділянках границі якої по чергово задавалися дійсна та уявна частини ( $\varphi(x, y)|_{A_i B_i} = \varphi_{*i}(M)$ ,  $\psi(x, y)|_{B_i A_{i+1}} = \psi_{*i}(M)$ , де  $M$  - біжуча точка відповідної ділянки). У випадку, якщо  $\varphi_{*i}$ ,  $\psi_{*i}$  – константи, то відповідна область комплексного потенціалу  $G_\omega$  буде внутрішністю многокутника з горизонтальними та вертикальними ребрами. Якщо  $G_z$  є верхньою півплощиною (див. рис. 1), а  $\varphi_{*i}$  та  $\psi_{*i}$  на відповідних ділянках дійсної осі «зв'язані лінійно» (при цьому область  $G_\omega$  буде внутрішністю довільного многокутника), то задача на знаходження такої функції зводиться до конформного відображення даної півплощини на такий многокутник, за допомогою формул Кристоффеля-Шварца.

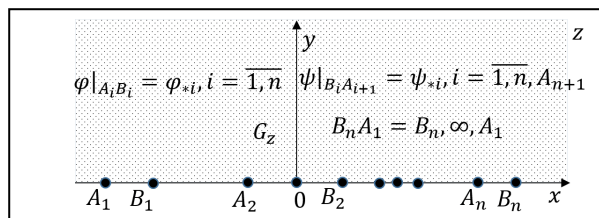


Рис. 1. Область  $G_z = \{z = x + iy, y > 0, -\infty < x < +\infty\}$

У роботах [4]-[11] розглядалися подібні задачі в областях, обмежених лініями течії та екіпотенціальними лініями. Їх розв'язки зводились до числових методів конформних та квазіконформних відображень даних областей на відповідні області комплексних потенціалів. На відміну від [1]-[3], в даних роботах розглядалися проблеми формування ідеальної течії в залежності від параметрів, що задають крайові умови. Зокрема, в роботі [10] описано деякі із характерних випадків формування ідеальної течії в залежності від заданих значень керуючого потенціалу. На основі модифікації методу сумарних зображень Г. Положого отримано характеристичну функцію течії, наводяться приклади побудови динамічної сітки, поля швидкості, приклади формування різних перетоків. При цьому виділені типи задач (ключових) для знаходження таких значень керуючого потенціалу, які оптимізують конкретні функціонали, наводиться приклад розв'язку однієї із них. А в [11] методологію моделювання процесів повільного руху рідин у водоймах, що ґрунтується на інтерпретації реальної течії деяким фіктивним квазіідеальним (типу фільтраційного) полем з наступним застосуванням наближених методів квазіконформних відображень, узагальнено на випадки збільшення кількості джерел збурення вихідної течії. Якщо природна течія не є близькою до ідеальної, то у низці випадків одержані розв'язки можуть використовуватися в якості нульового наближення шуканого поля (комплексного квазіпотенціалу, швидкості тощо). Запропонований підхід дає можливість відшукування ліній розділу основного та додаткового потоків, враховує фізичні аспекти процесу руху водяних мас, зокрема описаний вище фіктивний коефіцієнт провідності забезпечує близькість величини швидкості до нуля поблизу берегових ліній. При цьому забезпечується можливість задання окремих ділянок берегових ліній масивами точок (з подальшою інтерполяцією межі області деякими сплайнами, що є актуальним для реальних об'єктів із сильною хвилястістю їх меж). Особливістю розробленого алгоритму є можливість зупинки процедури обчислень при виконанні лише деяких із умов закінчення процесу з автоматичним визначенням тих ділянок фізичної

області фільтрації, де мають місце похибки більшій заданої точності наближень відносно інших умов, що дає змогу економніше використовувати машинний час. Це є актуальним, зокрема, у зв'язку із виявленням так званих «застійних зон» та «зон великих градієнтів», що виникають поблизу особливих точок негладких берегових ліній. Також у алгоритмі передбачено можливість зміни місця положення ділянки збурення потоку.

В даному ж дослідженні ставиться задача узагальнення запропонованої методології на випадки збільшення кількості граничних еквіпотенціалей, врахування різних додаткових факторів. А саме, моделювання процесів повільного руху води в деякій водоймі, обмеженій лініями втоку, витоків та береговими непроникними лініями. При цьому вважається, що глибина водойми є сталою, течія є відносно повільною, відсутні підземні джерела, не враховуємо вплив вітру тощо. Характеристику втоків та витоків характеризуємо відповідними значеннями потенціалів (що виражаються через висоти, напори, тиски), та витрат.

## II. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ

Розглядається фізична область  $G_z$  комплексної площини  $z$ , де  $z = x + iy$  (див. рис. 2),  $A_i, B_i$  ( $i = \overline{1, n}$ )

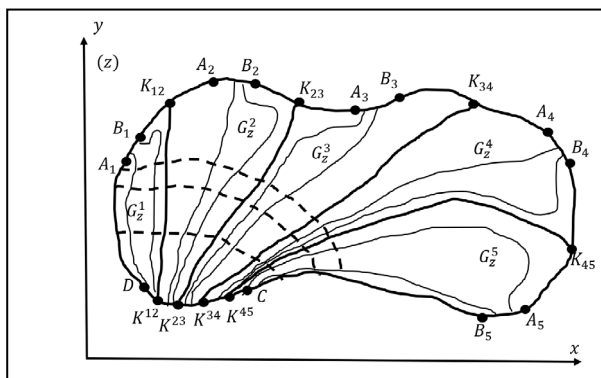


Рис. 2. Фізична область  $G_z$

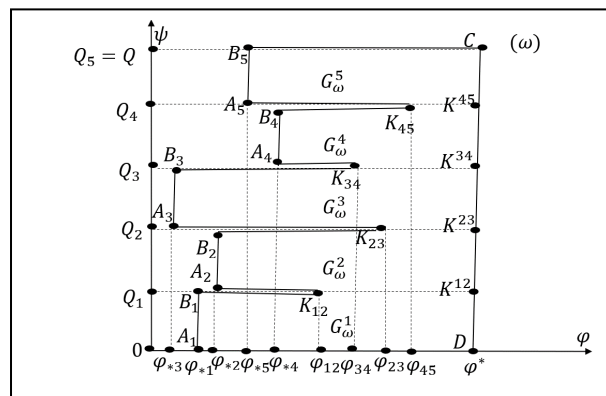
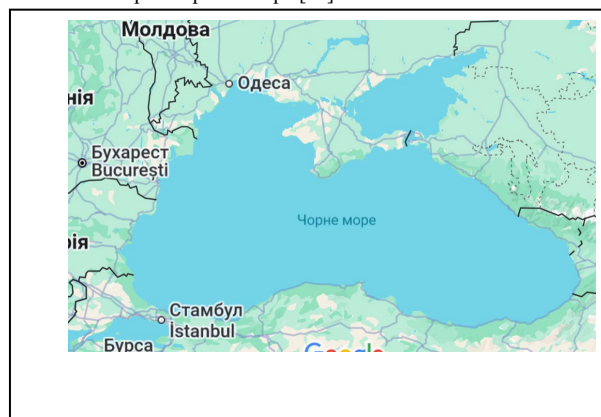


Рис. 3. Область комплексного потенціалу

– ділянки «втоку» (через  $\varphi_{*i}$ ,  $i = \overline{1, n}$  позначено відповідні потенціали),  $\overline{CD}$  – ділянка витоків,  $K_{i,i+1}$ ,  $K_{i+1,i}$  ( $i = \overline{1, n-1}$ ) – відповідно початкові та кінцеві точки лінії розділу течії (позначено жирними лініями). Відповідну область комплексного потенціалу зображено на рис. 3, де через  $Q_1$ ,

$Q_2 = Q_1 + Q_{12}, \dots, Q_n$  ( $n = 5$ ) позначені 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  $G_\omega$  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  $G_\omega$  на  $G_z$ .

Рис. 4. Карта Чорного моря [12]



В перспективі є застосування запропонованої методології до розрахунку гідродинамічної сітки у Чорному морі при умові, що відповідна течія є стаціонарною та ідеальною (див рис. 4).

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Lavrent'ev, M.A. and Shabat, B.V. Methods of Complex Variable Theory. - M. Nauka, 1973.
- [2] Gurvits A., Kurant R. The theory of functions. - M.: Nauka, 1968.
- [3] Lavrentiev, M.A., Shabat, B.V., Problems of hydrodynamics and their mathematical Models, - M. Nauka, 1977.
- [4] Бомба А.Я., Булавацький В.М., Скопєцький В.В. Нелінійні математичні моделі процесів геогідродинаміки. – К.: Наукова думка, 2007. – 308 с.
- [5] Бомба А.Я., Каштан С.С., Пригорницький Д.О., Ярошак С.В. Методи комплексного аналізу. – Рівне: НУВГП, 2013. – 415 с.
- [6] Бомба А.Я., Сінчук А.М., Ярошак С.В. Моделювання фільтраційних процесів у нафтогазових пластах числовими методами квазіконформних відображень. – Рівне: «Асоль», 2016. – 238 с.
- [7] Бомба А.Я., Гладка О.М., Кузьменко А.П. Обчислювальні технології на основі методів комплексного аналізу та сумарних зображень. – Рівне: «Асоль», 2016. – 283 с.
- [8] Бомба А.Я., Бойчура М. В. Методи комплексного аналізу в задачах ідентифікації. – Рівне: НУВГП, 2020. – 201 с.
- [9] 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.
- [10] Bomba A.Ya., Kashtan S. S., Skopetski 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.
- [11] Бомба А. Я., Бойчура М. В., Савюк С. В. Числові методи квазіконформних відображень моделювання повільного руху рідини у водоймах. - Вісник НУВГП. – №2(74) – 2016. – С.92-106.

# Математичне моделювання одного класу фільтраційних і гідравлічних процесів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.087>

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** — У роботі досліджуються ідеальні та квазіідеальні поля одного класу фільтраційних і гідравлічних процесів на прикладі озера Нобель (Рівненська область), при наявності джерела поперечних збурень в областях обмежених лініями течії та еквіпотенціальними лініями. В залежності від значень потенціалів на еквіпотенціальних лініях, можливі різні випадки формування ліній розділу фільтраційних потоків у фізичній області, а отже – побудови області квазікомплексного потенціалу. Наближений розв’язок крайової задачі із ділянкою збурення на лінії течії отримується за допомогою алгоритму, який ґрунтується на почерговій параметризації величин конформних інваріантів, граничних і внутрішніх вузлів сіткової області з використанням ідей методу блочної ітерації. Запропонований підхід, окрім ідентифікації кривих, дозволяє паралельно знаходити характеристичну функцію течії, квазікомплексний потенціал, повну витрату, будувати в заданій області динамічну сітку та розрахувати поле швидкості фільтрації

При моделюванні процесів масопереносу (наприклад, фільтрації) в пористих середовищах можливі випадки існування сильно проникних шарів, які відокремлюються від відповідних досліджуваних частин деякими кривими, які потрібно знайти (ідентифікувати) в процесі розв’язування задачі. При побудові математичної моделі відповідного фізичного процесу вважаємо сильно проникне середовище «ідеально (теоретично нескінченно) проникним». У цьому випадку шукану криву можна вважати еквіпотенціальною лінією. У цій роботі розглядається стаціонарний процес руху рідини в неоднорідно анізотропному горизонтальному нескінченно великих розмірів пласті – ґрунтовому масиві, що обмежений нескінченними ділянками кривих, зокрема – шуканою кривою теоретичного водоупору та горизонтальною віссю, на якій відома локальна швидкість руху. На основі методів квазіконформних відображень запропоновано підхід до ідентифікації такої кривої розділу середовищ. Побудований алгоритм модифіковано для розв’язування нелінійних обернених крайових задач на квазіконформній відображення криволінійних багатокутних областей, обмежених невизначеними лініями течії та еквіпотенціальними лініями

**Ключові слова** — моделювання, конформні та квазіконформні відображення, обернені задачі, фільтраційні потоки, джерело збурень, керування, числові методи, озеро Нобель

## І. ВСТУП

У цьому дослідженні представлені нові підходи до моделювання глобальних процесів руху поверхневих і підземних вод. Основною метою є розробка і аналіз відповідних математичних моделей та розвиток числових методів комплексного аналізу, які забезпечують можливість ефективно описувати і прогнозувати динаміку водних систем на глобальному рівні.

Дослідження охоплює аналіз формування ідеальної течії в залежності від заданих значень керуючого потенціалу [1, 2, 3]. Ідеальна течія, у цьому підході, розглядається як безв’язкий потік з відсутністю тертя, що дозволяє спростити аналіз і зосередитися на фундаментальних властивостях водних потоків. Моделі аналізуються в контексті різних геометричних конфігурацій і умов, що дозволяє виявити основні закономірності і механізми формування водних потоків у різних екосистемах.

Зокрема, на основі модифікації числового методу комплексного аналізу отримано комплексний потенціал та характеристичну функцію течії, наводяться приклади побудови динамічних сіток, ліній розділу течії, поля швидкості, формування різних перетоків (див., напр., рис.1). При цьому виділено типи так званих ключових задач стосовно знаходження таких значень керуючого потенціалу, які забезпечують оптимізацію конкретних функціоналів [2, 4, 5].

Застосування методів та підходів комплексного аналізу дозволяє детально дослідити вплив різних параметрів керуючого потенціалу на форму і характеристики течії. Проведено чисельні експерименти для оцінки точності моделей і верифікації їх з експериментальними даними. Результати показують, що побудовані моделі можуть адекватно описувати динаміку як поверхневих, так і підземних вод, що відкриває нові можливості для прогнозування і управління водними ресурсами на глобальному рівні.

Розроблені моделі дозволяють отримати результати із хорошою точністю та створюють нові інструменти для аналізу та управління водними екосистемами. Майбутні дослідження можуть бути зосереджені на розширенні цих моделей на випадки

врахування в'язкості і тертя, а також на застосування розроблених підходів для моделювання та прогнозування впливу кліматичних змін і антропогенних факторів на водні ресурси.

В багатьох випадках практики формули на знаходження характеристик середовища потребують задання функції швидкості. В реальних фізичних задачах, зокрема в задачах фільтрації, гідрології, часто це зробити або неможливо, або дуже складно. Тому запропоновано підхід, при якому по відомих значеннях потенціалів на кожній із ділянок витоку та втоку рідини в досліджувану область будується відповідна область квазікомплексного потенціалу.

## II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі [2] описано розроблений метод обернених крайових задач (конформних і квазіконформних відображень) для побудови динамічної сітки потенційних та квазіпотенційних полів, побудови різного роду профілів та поля швидкості із паралельним розрахунком різних характеристик процесу. Тут, під оберненням такого роду задач мається на увазі як перехід від прямих задач до задач на конформне відображення відповідної області комплексного потенціалу на вихідну область, так і той факт, що вони містять невідомі параметри при додаткових відомостях про їх розв'язки.

Методику наближення розв'язків крайових еліптичних задач, можна перенести і на крайові задачі, які зводяться до конформних відображень довільної криволінійної області, обмеженої лініями течії та еквіпотенціальними лініями на область комплексного потенціалу, що має вигляд многокутника, границя якого складається із вертикальних та горизонтальних відрізків, променів, із декількома невідомими при відповідності вершин.

Також, розв'язана проблема нелінійного обернення крайових задач на конформні відображення в областях, обмежених лініями течії та еквіпотенціальними лініями з потенціалом керування на ділянці однієї із ліній течії. Окрім шуканого потенціалу і функції течії, у результаті побудовано ще й характеристичну функцію, описані усі можливі характерні випадки формування течії в залежності від заданих значень потенціалу керування, наводяться схеми побудови динамічної сітки, формування відповідних перетоків. При цьому, виділено типи задач (ключових) на знаходження тих значень потенціалу керування, що забезпечують оптимізацію певних функціоналів (витрат, витоку, втоку, перетоків, ін.).

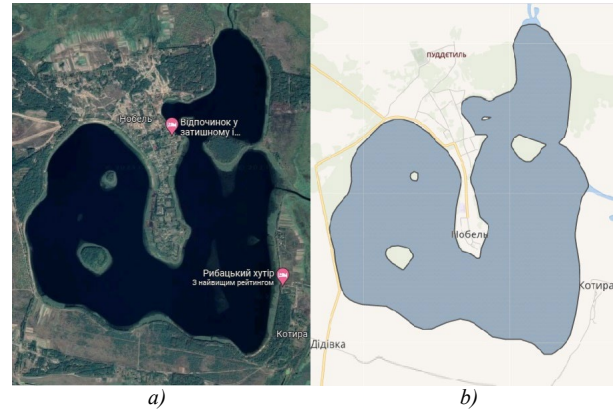


Рис. 1. Картографічне зображення озера Нобель  
а) картографічні дані: © Google, 2024  
б) карти Вікімедіа, [8]

Озеро Нобель розташоване у заплаві річки Прип'ять (Дніпровського басейну). Розділене на дві половини півостровом, який простягається з півночі на південь і на якому лежить село Нобель. Східна (більша) частина озера вузька і видовжена з півночі на південь, західна (менша) частина більш овальна. Є чотири острови – два великі і два малі. Підживлення відбувається за рахунок водообміну з річкою Прип'ять, яка впадає в його східну частину з півночі і впливає з нього зі східного боку [8].

## III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо модельну задачу на відшукування гармонічної функції  $\varphi = \varphi(x, y)$  (потенціалу) в скінченій однозв'язній криволінійній області (пласт, що піддається певному впливу, напр., зміні, деформації)  $G_z = ABMNKCD$  ( $z = x + iy$ ), обмеженій чотирма гладкими кривими (див. рис. 1):

$$\begin{aligned} AB &= \left\{ z: f_1(x, y) = x - 1 - \sin \frac{y}{2} = 0 \right\}, \\ BMNKC &= \left\{ z: f_2(x, y) = y - 18 - e^{\sin 0.5x} = 0 \right\}, \\ CD &= \left\{ z: f_3(x, y) = x - 20 - \cos \frac{y}{2} = 0 \right\}, \\ DA &= \left\{ z: f_4(x, y) = y - 1 - \cos \frac{x}{3} = 0 \right\} \end{aligned}$$

при умовах

$$\varphi|_{AB} = \varphi_* = 0, \quad \varphi|_{CD} = \varphi^* = 1, \quad \varphi|_{MN} = \varphi^\circ,$$

$$\frac{d\varphi}{dn} \Big|_{DA} = \frac{d\varphi}{dn} \Big|_{NKC} = \frac{d\varphi}{dn} \Big|_{BM} = 0,$$

де  $n$  – зовнішня нормаль до відповідної кривої [2].

## IV. МЕТОДИ

Ввівши гармонічну функцію  $\psi = \psi(x, y)$  (функцію течії), комплексно спряжену до функції  $\varphi = \varphi(x, y)$ , і замінивши останні три граничні умови на умови



$$\psi|_{DA}=0, \quad \psi|_{NKC}=\varrho_1, \quad \psi|_{BM}=\varrho_2,$$

де  $\varrho_1, \varrho_2$  – величини фільтраційних потоків (невідомі параметри), цю задачу замінимо [2] більш загальною задачею на конформне відображення  $\omega=\omega(z)=\varphi(x,y)+i\psi(x,y)$  фізичної області  $G_z$  на

$$\text{область комплексного потенціалу } G_\omega=\bigcup_{l=1}^4 G_\omega^{(l)},$$

$$G_\omega^{(1)}=\{(\varphi,\psi):\tilde{\varphi}\leq\varphi<\varphi^*, 0<\psi<\varrho_1\},$$

$$G_\omega^{(2)}=\{(\varphi,\psi):\varphi_*<\varphi<\tilde{\varphi}, 0<\psi<\varrho_1\},$$

$$G_\omega^{(3)}=\{(\varphi,\psi):\varphi_*<\varphi<\tilde{\varphi}, \varrho_1\leq\psi<\varrho_2\},$$

$$G_\omega^{(4)}=\{(\varphi,\psi):\tilde{\varphi}<\varphi<\varphi^*, \varrho_1\leq\psi<\varrho_2\}.$$

Тоді, відповідна обернена крайова задача на конформне відображення  $z=z(\omega)=x(\varphi,\psi)+iy(\varphi,\psi)$  області  $G_\omega$  на  $G_z$  при невідомих  $\tilde{\varphi}, \varrho_1, \varrho_2$  у диференціальній формі запишеться у вигляді:

$$\left\{ \frac{\partial y}{\partial \psi} = \frac{\partial x}{\partial \varphi}, \quad \frac{\partial x}{\partial \psi} = -\frac{\partial y}{\partial \varphi}, \quad (\varphi,\psi) \in G_\omega; \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} f_1(x(\varphi_*, \psi), y(\varphi_*, \psi)) &= 0, \quad 0 \leq \psi \leq \varrho_2, \\ f_2(x(\varphi, \varrho_2), y(\varphi, \varrho_2)) &= 0, \quad \varphi_* \leq \varphi \leq \varphi^0, \\ f_2(x(\varphi^0, \psi), y(\varphi^0, \psi)) &= 0, \quad \varrho_1 \leq \psi \leq \varrho_2, \\ f_2(x(\varphi, \varrho_1 - 0), y(\varphi, \varrho_1 - 0)) &= 0, \quad \tilde{\varphi} \leq \varphi \leq \varphi^*, \\ f_2(x(\varphi, \varrho_1 + 0), y(\varphi, \varrho_1 + 0)) &= 0, \quad \tilde{\varphi} \leq \varphi \leq \varphi^0, \\ f_3(x(\varphi^*, \psi), y(\varphi^*, \psi)) &= 0, \quad 0 \leq \psi \leq \varrho_1, \\ f_4(x(\varphi, 0), y(\varphi, 0)) &= 0, \quad \varphi_* \leq \varphi \leq \varphi^*. \end{aligned} \right.$$

Наближений розв’язок поставленої задачі отримано за допомогою розробленого програмного продукту, побудованого на основі алгоритму, який ґрунтується на почерговій параметризації величин конформних інваріантів, граничних і внутрішніх вузлів сіткової області  $G_z$  з використанням ідей методу блочної ітерації [2].

### V. Випадки

Аналізуючи отримані у цій роботі та у [2] результати можна зробити висновок, що лінії розділу фільтраційних потоків за умови відсутності перетоку із джерелом збурення  $MN$  будуть утворюватися за подібним профілем у фізичній області  $G_z$ . При чому, основна точка їх розділу – точка  $K$  – буде пробігати від точки  $N$  до точки  $C$ , а значення потенціалу  $\varphi|_K = \tilde{\varphi}$  знаходитиметься у межах  $\varphi|_{MN} \leq \varphi|_K \leq \varphi|_{CD}$ , що визначатиме ключові випадки. У цих випадках значення потенціалу  $\varphi^0$  знаходиться в процесі розв’язання відповідної задачі

при додатковій (“компенсаційній”) умові про відоме положення точки  $K$ .

Також, ключовим випадком буде ситуація, коли  $\varphi|_{CD} = \varphi|_{MN} = \varphi^0 = \varphi^* = 1$ . У цьому ж випадку в процесі розв’язання відповідної задачі визначається положення точки  $K$ . Таким чином, в залежності від значень потенціалу  $\varphi^0$  на додаткових еквіпотенціальних лініях (джерелах збурення  $MN$ ) при збільшенні кількості еквіпотенціальних ділянок границі області, а також її зв’язності, область комплексного потенціалу  $G_\omega = G_\omega(\varphi^0)$  будується індивідуально. У більш ширшому сенсі, в залежності від значення потенціалу  $-\infty < \varphi^0 < +\infty$ , можливі різні випадки формування течії у фізичній області, а отже – побудови області квазікомплексного потенціалу [2].

Запропонована методика, окрім знаходження характеристичної функції течії та комплексного потенціалу, дозволяє одночасно будувати в заданій області динамічну сітку та моделювати лінії розділу фільтраційних потоків, розрахувати поле швидкості фільтрації, а також розраховувати обчислювальні (ітераційні) характеристики та досліджувати і аналізувати процеси їх збіжності і стійкості.

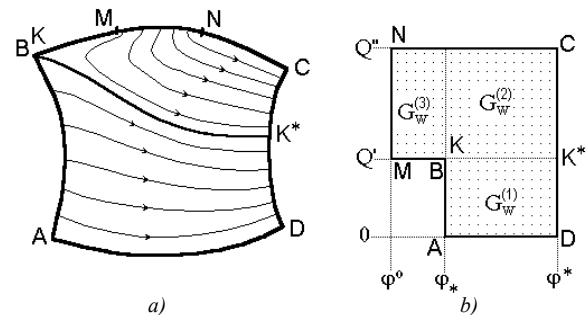


Рис. 2. Схематичне зображення «нескінченної» фізичної області (а) та області квазікомплексного потенціалу (б)

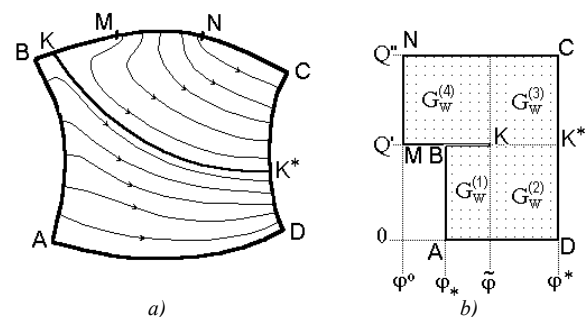


Рис. 3. Схематичне зображення «нескінченної» фізичної області (а) та області квазікомплексного потенціалу (б)



ВИСНОВКИ

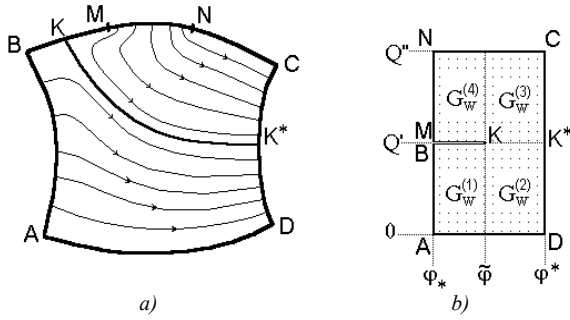


Рис. 4. Схематичне зображення «нескінченної» фізичної області (а) та області квазікомплексного потенціалу (б)

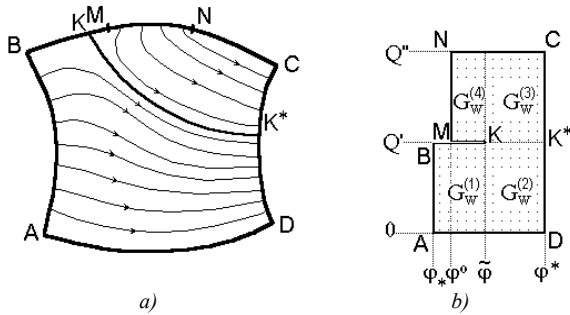


Рис. 5. Схематичне зображення «нескінченної» фізичної області (а) та області квазікомплексного потенціалу (б)

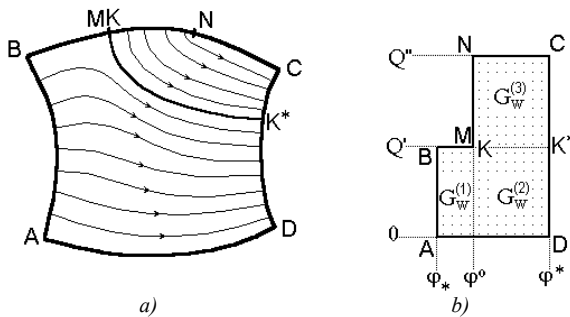


Рис. 6. Схематичне зображення «нескінченної» фізичної області (а) та області квазікомплексного потенціалу (б)

Розглянута методика наближення розв'язків крайових еліптичних задач, переноситься і на крайові задачі, які зводяться до конформних відображень довільної криволінійної області, обмеженої лініями течії та еквіпотенціальними лініями на область комплексного потенціалу, що має вигляд багатокутника, границя якого складається із вертикальних та горизонтальних відрізків, променів, із декількома невідомими при відповідності вершин. Проблема існування розв'язків такого роду задач є давно розв'язаною лише в загальному. В кожному конкретному випадку розв'язність задачі забезпечується шляхом підбору відповідних параметрів.

Розроблена методика розв'язання нелінійних крайових задач дозволяє розраховувати координати вузлів гідродинамічної сітки, обчислювати фільтраційні витрати, величини швидкості руху та інші параметри досліджуваних процесів, а також ідентифікувати криві розділу сильно проникних шарів. Розв'язок задачі отримується шляхом поетапного фіксування характеристик середовища та процесу і врахування механізму їх взаємовпливу. Результати проведених нами досліджень у цій та інших роботах приводять до необхідності перегляду методик, пов'язаних із розрахунками характеристик середовища та процесу, з метою уточнення останніх (при проектуванні дренажних споруд, оптимізації теплосистем, з ідентифікацією параметрів і керуванням процесами у нафтогазових пластах).

У перспективі – моделювання та прогнозування роботи слабопровідних (близьких до сланцевих) пластів в умовах гідророзриву, а також до побудови ліній розділу різнокольорових рідин при прогнозуванні квазіідеальної течії у водоймах, обмежених лініями течії та еквіпотенціальними лініями.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] А.Я. Бомба, В.М. Булавацький, В.В. Скопечкий, "Нелінійні математичні моделі процесів геогідродинаміки," Київ: Наукова думка, 2007. 308 с.
- [2] А.Я. Бомба, С.С. Каштан, Д.О. Пригорницький, С.В. Ярошак, "Методи комплексного аналізу," Рівне: НУВГП, 2013. 415 с.
- [3] А.Я. Бомба, А.М. Сінчук, С.В. Ярошак, "Моделювання фільтраційних процесів у нафтогазових пластах числовими методами квазіконформних відображень," Рівне: «Асоль», 2016. 238 с.
- [4] А.Я. Бомба, О.М. Гладка, А.П. Кузьменко, "Обчислювальні технології на основі методів комплексного аналізу та сумарних зображень," Рівне: «Асоль», 2016. 283 с.
- [5] А.Я. Бомба, М.В. Бойчура, "Методи комплексного аналізу в задачах ідентифікації," Рівне: НУВГП, 2020. 201 с.
- [6] А.Я. Бомба, С.С. Каштан, О.О. Кушнір, "Методи комплексного аналізу моделювання глобальних процесів руху поверхневих та підземних вод," Математичні проблеми механіки неоднорідних структур: збірник наукових праць 11-ї Міжнародної наукової конференції / за заг. ред. Р.М.Кушніра і Ю.В.Токового. Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім.Я.С.Підстригача НАН України, 2024. Вип. 6. С. 65-66.
- [7] "Гідрологічний режим та гідрологічні процеси," URL: <http://www.geograf.com.ua/zagalna-gidrologiya/3173-gidrologichnij-rezhim-ta-gidrologichni-protsesi> (дата звернення: 12.10.2024).
- [8] "Нобель (озеро)," URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Нобель\\_\(озеро\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Нобель_(озеро)) (дата звернення: 12.10.2024).

# Ідентифікація координат імпульсних джерел забруднень стічних вод в кусково-однорідних середовищах числовими методами квазіконформних відображень

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.088>

Андрій Бомба

Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
a.ya.bomba@nuwm.edu.ua

Михайло Бойчура

Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
m.v.boichura@nuwm.edu.ua

Сергій Шатний

Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
s.v.shatnyi@nuwm.edu.ua

Ольга Багнюк

Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
o.m.bahniuk@nuwm.edu.ua

Наталія Іванчук

Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
n.v.medvid@nuwm.edu.ua

**Анотація** – Підхід до ідентифікації імпульсних точкових джерел забруднень перенесено на випадок кусково-однорідного середовища за заданими координатами виявлення домішкової речовини та моментами часу її появи.

**Ключові слова** – математичне моделювання; кусково-конформні відображення; нелінійні задачі; числові методи; точкове джерело.

## 1. ВСТУП

Розглядається процес фільтрації в однозв'язній криволінійній області, обмеженій лініями течії та екіпотенціальними лініями за умови, що досліджуване середовище є кусково-однорідним (рис. 1). Припускається, що окремі наперед невідомі криві виступають у якості імпульсних джерел забруднень. При цьому вважаємо, що їх поширення відбувається лише за рахунок конвективної складової, суттєво не впливаючи на фільтраційний фон. Для ідентифікації координат джерел забруднень запропоновано використовувати метод характеристик щодо розв'язання рівняння конвекції. У такому випадку в якості апріорних даних можуть виступати квазіпотенціали на ділянках входу та виходу рідини на границі області, координати точок виявлення забруднення та час його руху по течії. Загальний алгоритм передбачає адаптацію

числового методу квазіконформних відображень для побудови гідродинамічної сітки, на основі чого – ідентифікацію координат джерел забруднень.

Проведено числові експерименти та здійснено їх аналіз (рис. 2). Зокрема підкреслено, що при достатньому розбитті сітки максимальні нев'язки між апріорно відомими даними та розрахунковими є невеликими у порівнянні з розмірами досліджуваної області. Це свідчить про ефективність розробленого алгоритму ідентифікації джерел забруднень у випадку кусково-однорідного середовища. У якості додаткових мір для зниження величини нев'язок пропонується використовувати більш точні схеми наближення окремих виразів. З іншого боку, спостерігається збільшення обчислювальної складності в порівнянні з випадком неперервного задання коефіцієнта фільтрації. Враховуючи порівняно високу точність розрахунків вбачається за доцільне подальший розвиток розробленого підходу на більш масштабні, в порівнянні із точковими джерелами забруднень, та просторовий простір випадок.

Враховуючи чутливість розв'язків до розриву значень коефіцієнта фільтрації варто також у перспективі вводити додаткові умови на контакті однорідних середовищ.

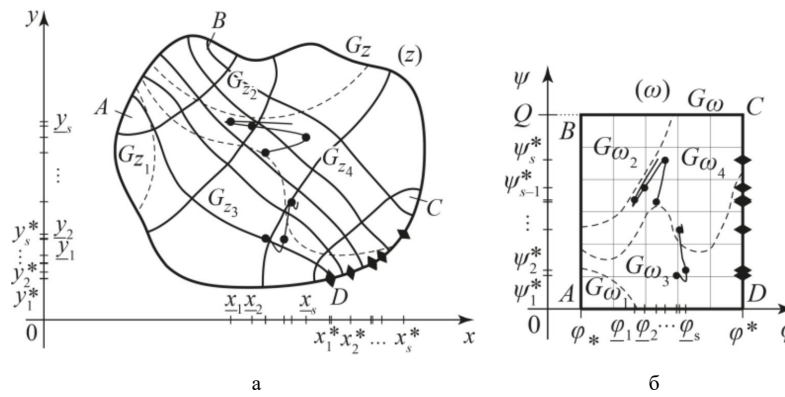


Рисунок 1. Фізична область  $G_z$  (а) та відповідна область комплексного квазіпотенціалу  $G_\omega$  (б); штрихами позначено лінії розділу однорідностей; крапками та ромбами – джерела забруднень і точки їх виявлення, відповідно

II. МЕТА

Метою роботи є перенесення розробленого (на основі числових методів квазіконформних відображень та характеристик) комбінованого підходу до ідентифікації координат точкових імпульсних джерел (забруднень, теплових, вибухів тощо) за даними їх спостережень на певних проміжках часу у характерних точках на випадок кусково-однорідних середовищ [1 – 7].

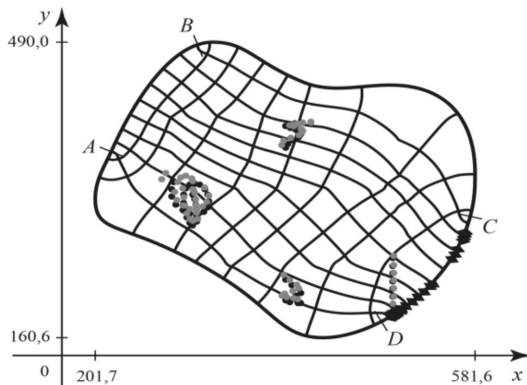


Рисунок 2. Гідродинамічна сітка з розрахунковими та еталонними координатами джерел забруднень (зображені, відповідно, сірим та чорним кольорами); ромбами позначено апріорно відомі заміри

III. ВИСНОВКИ

Розроблено алгоритм, який передбачає числове моделювання руху частинок та використання методу характеристик щодо розв’язання рівняння конвекції. У результаті проведення числових експериментів показано ефективність розробленого алгоритму. Найбільші нев’язки між апріорно відомими даними та розрахунковими виявлені в близькості тих ліній течії, які проходять через застійні зони чи зони великих градієнтів. Суттєві неточності також виникають на ділянках контакту середовищ із різними значеннями коефіцієнта фільтрації. Варто також врахувати, що інтегральне рівняння для ідентифікації джерел забруднень розв’язувалося за допомогою формули лівих прямокутників.

Зменшити похибки розрахунків можливо за рахунок використання більш точних схем наближення формул, збільшення кількості вузлів розбиття та задання додаткових умов на ділянках контакту середовищ з різними коефіцієнтами фільтрації.

У перспективі: врахування дифузійної складової [4], моделювання тонких включень виду [7], ідентифікація масштабніших, в порівнянні з точковими джерелами забруднень, перенесення алгоритму на простір та врахування множинності ділянок прикладання квазіпотенціалів [5].

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Бомба А.Я., Бойчура М.В., Шатний С.В., Багнюк О.М., Іванчук Н.В. Ідентифікація координат імпульсних джерел забруднень стічних вод в кусково-однорідних середовищах числовими методами квазіконформних відображень. Математичне та комп’ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. Кам’янець-Подільський: Кам’янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2024. С. 10–21.
- [2] Власюк А.П., Багнюк О.М. Знаходження невідомих параметрів джерела забруднення в одновимірних нестационарних задачах масопереносу. Математичне та комп’ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць. Кам’янець-Подільський: Кам’янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2014. Вип. 11. С. 29–36.
- [3] Бомба А. Я., Бойчура М.В., Багнюк О.М., Абдулалі А.А. Ідентифікація координат імпульсних джерел числовими методами квазіконформних відображень. Математичне та комп’ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць. Кам’янець-Подільський: Кам’янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2022. Вип. 23. С. 20–30.
- [4] Бомба А.Я., Присяжнюк І.М., Присяжнюк О.В. Методи теорії збурень прогнозування процесів тепломасоперенесення в пористих та мікропористих середовищах: монографія. Рівне: НУВГП, 2017. 292 с.
- [5] Бомба А.Я., Каштан С.С., Пригорницький Д.О., Ярошак С.В. Методи комплексного аналізу: монографія. Рівне: НУВГП, 2013. 430 с.
- [6] Бомба А.Я., Бойчура М.В. Методи комплексного аналізу в задачах ідентифікації: монографія. Рівне: НУВГП, 2020. 188 с.
- [7] O. Michuta, N. Ivanchuk, P. Martyniuk and O. Ostapchuk, “A finite-element study of elastic filtration in soils with thin inclusions,” Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, Vol. 5 (5), pp. 41–48.

# Обчислювальні технології для нелокальних початково-крайових задач гідромеханіки

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.089>

Віктор Ванін

Національний технічний університет «ХПІ»  
Харків, Україна  
vvanlb5256@gmail.com

Олексій Лебідь

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України  
Київ, Україна  
o.g.lebid@gmail.com

Дмитро Черній

Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Київ, Україна  
D\_Cherniy@ukr.net

**Анотація** – Представлено обчислювальні технології на основі методу дискретних особливостей та їх застосування для нелокальних початково-крайових задач гідромеханіки в областях з різнотипними непроникними рухомими межами.

**Ключові слова** – метод дискретних вихорів, метод дискретних особливостей, обчислювальні технології.

## ВСТУП

При постановці плоских нелокальних початково-крайових задач гідромеханіки (з відривними течіями, з проникненням скрізь межу відокремлення середовищ, з утворенням струменів та кумулятивними явищами,...), якими є задачі з рухомою вільною межею що складається з різнотипних непроникних рухомих меж - контурів  $L_d(t)$ ,  $L_v(t)$  та  $L_s(t)$  в деформуємої області  $D(t)$  важливо відрізнити фізичну (рис. 1) і математичну постановки задач (рис. 2).

### Фізична постановка задачі

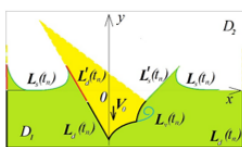


Рис. 1.

$$\begin{aligned} \vec{r} \in L_d(t) \quad \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{L_d} &= (\vec{W}_d, \vec{n}) \Big|_{L_d} \quad (3) \\ \vec{r} \in L_v(t) \quad \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{L_v} &= \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{L_v} \quad (4) \\ P_{L_v}^+ &= P_{L_v}^- \quad (5) \\ t=0: \quad \nabla \varphi \Big|_{r=0} &= 0 \quad (8) \\ \varphi \Big|_{r \rightarrow \infty} &\rightarrow 0, \quad \nabla \varphi \Big|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (9) \\ |\nabla \varphi| &< \infty \text{ на } L(t) \quad (10) \end{aligned}$$

### Математична постановка задачі

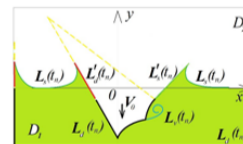


Рис. 2.

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi(x, y, t) \quad \vec{V} = \nabla \varphi \quad (1) \\ t \geq t_0: \quad \Delta \varphi &= 0 \quad \vec{r} \in D \quad (2) \\ \text{на } L(t) &= L_d(t) + L_v(t) + L_s(t) : \\ \vec{r} \in L_d(t) \quad \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{L_d} &= (\vec{W}_d, \vec{n}) \Big|_{L_d} \quad (3) \\ \vec{r} \in L_v(t) \quad \frac{d\vec{r}}{dt} &= \frac{1}{2}(\nabla \varphi^* + \nabla \varphi) \Big|_{L_v} \quad (4) \\ \vec{r}_v(t_0) &\in L_v(t_0) \quad (4'') \\ \frac{d}{dt}(\varphi - \varphi^*) \Big|_{L_v} &= 0 \quad (5) \\ \vec{r} \in L_s(t) \quad \frac{d\vec{r}}{dt} &= \nabla \varphi \Big|_{L_s} \quad (6) \\ \vec{r}_s(t_0) &\in L_s(t_0) \quad (6'') \\ \frac{d\varphi}{dt} \Big|_{L_s} &= \left( \frac{(\nabla \varphi)^2}{2} - \frac{\eta}{r^2} \right) \Big|_{L_s} \quad (7) \\ t=0: \quad \nabla \varphi \Big|_{r=0} &= 0 \quad (8) \\ \nabla \varphi \Big|_{r \rightarrow \infty} &\rightarrow 0 \quad (9) \\ \varphi \Big|_{r \rightarrow \infty} &\rightarrow 0 \quad (9) \\ |\nabla \varphi| &< \infty \text{ на } L(t) \quad (10) \end{aligned}$$

Для вирішення прикладних плоских нелокальних початково-крайових задач гідромеханіки (з відривними течіями, з проникненням скрізь межу відокремлення середовищ, з утворенням струменів та кумулятивними явищами,...), якими є задачі з рухомою вільною межею що складається з різнотипних непроникних рухомих меж - контурів  $L_d(t)$ ,  $L_v(t)$  та  $L_s(t)$  в деформуємої області  $D(t)$  (Рис.1) використовується математична модель (с параметричною залежністю від часу  $t$ , яка в термінах ТФКЗ має інтегральні представлення:

$$\begin{aligned} \Phi(z, t) &= \phi(x, y, t) + i\psi(x, y, t) = \\ &+ \frac{1}{2\pi i} \int_{L_d(t)} \gamma(\omega, t) \ln(z - \omega) d\omega + \\ &+ \frac{1}{2\pi i} \int_{L_v(t)} \gamma(\omega, t) \ln(z - \omega) d\omega + \\ &+ \frac{1}{2\pi i} \int_{L_s(t)} \gamma(\omega, t) \ln(z - \omega) d\omega + C(t) \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}(z, t) &= u(x, y, t) - iv(x, y, t) = \frac{\partial \Phi(z, t)}{\partial z} = \\ &= \frac{1}{2\pi i} \int_{L_d(t)} \frac{\gamma(\omega, t)}{z-\omega} d\omega + \\ &+ \frac{1}{2\pi i} \int_{L_v(t)} \frac{\gamma(\omega, t)}{z-\omega} d\omega + \\ &+ \frac{1}{2\pi i} \int_{L_s(t)} \frac{\gamma(\omega, t)}{z-\omega} d\omega \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \int_{L_d(t)} \gamma(\omega, t) d\omega + \int_{L_v(t)} \gamma(\omega, t) d\omega + \\ + \int_{L_s(t)} \gamma(\omega, t) d\omega = \Gamma_0 = const \end{aligned} \quad (14)$$

Але, в силу мінливості області із задалегідь невідомою формою частини меж, рішення задачі про нестационарні течії в областях з непроникними рухомими межами довільної форми можливо тільки чисельними методами, з використанням обчислювальних технологій, в яких враховано формування нових елементів меж області із визначених раніш типів.

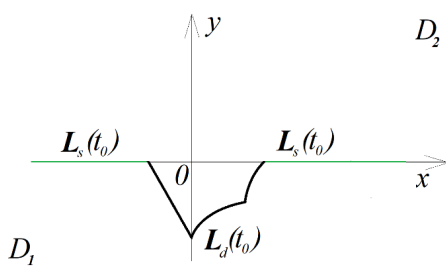


Рис. 3. Вигляд деформованого рухомого контура до породження нових елементів

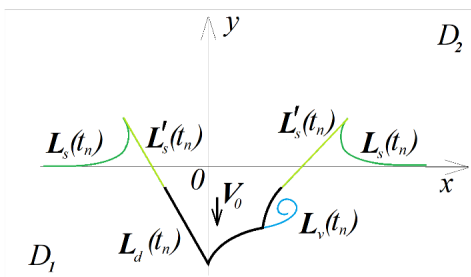


Рис. 4. Вигляд деформованого рухомого контура з породженням нових елементів.

У доповіді представлено методи побудови обчислювальних технологій на основі чисельних

методів розв'язування сингулярних та гіперсингулярних інтегральних рівнянь та наведено приклади розв'язання комплексу практичних задач прикладної гідромеханіки.

ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

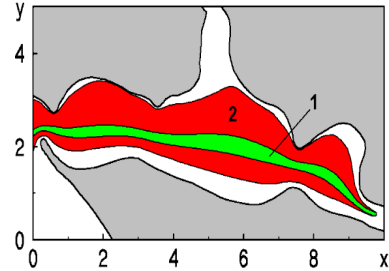


Рис. 3.

Гідрологічні та гідротехнічні задачі. Прогноз площі забруднення в Дніпровсько-Бузькому лимані при відсутності вітру (1) і з урахуванням вітрового навантаження (2).

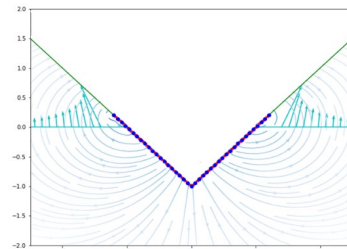


Рис.4

Розв'язання задачі Вагнера

REFERENCES

- [1] Cherniy D.I. Approximation of Solution of Initial-Boundary Problem with Moving Boundary. //Journal of Computational and Applied Mathematics, №2(82), 1997, pp.112-123.
- [2] Cherniy D.I. Computational technologies of discrete vortices method. // Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», -2016.- № 6 (1178), pp.116-123.
- [3] Dovgii, S.O., Lyashko, S.I., Cherniy, D.I. Algorithms of the Discrete Singularity Method for Computing Technologies // Cybernetics and Systems Analysis, 53 (6).-2017.- pp. 950-962.
- [4] Cherniy D. I. Derivatives of Integral Expressions. //Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Series Physics & Mathematics №3, 2016,pp. 121-126.
- [5] Довгий С.А., Лифанов И.К., Черний Д.И. Метод сингулярных интегральных уравнений и вычислительные технологии. – К.: Юстон, 2016.- 380с.
- [6] Sarpkaya T.Computational Methods With Vortices - The 1988 Freeman Scholar Lecture. // Journal of Fluids Engeniring, Vol.111/5, March 1989.,pp.1-60.
- [7] Матвієнко В.Т., Методи оптимізації параметричних систем./ Володимир Т. Матвієнко, Володимир В. Пічкур, Дмитро І. Черній Д.І.//Журнал обчислювальної та прикладної математики.,№1 т(135) 2021, с.с.151-157.



# Аналіз моделей оцінки довговічності талевих канатів бурових установок

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.090>

Ярослав Гриджук  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу  
Івано-Франківськ, Україна  
jaroslav.gridzhuk@gmail.com

Андрій Михайлів  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу  
Івано-Франківськ, Україна  
Sergiy.mychajliuk@gmail.com

Роман Михайлів  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу  
Івано-Франківськ, Україна  
romanmy19@gmail.com

**Анотація** – Талеві канати є одними із найбільш навантажених елементів талевих систем вантажопідіймних машин та обладнання, зокрема, і бурових установок. Виконання спуско-підіймальних операцій та утримання бурильної колони в процесі буріння є основним призначенням талевих канатів, прогнозування довговічності яких забезпечує цикл безаварійної роботи бурової установки.

**Ключові слова** – бурова установка; довговічність; втома; згинальний момент; осьове навантаження; талевий канат; руйнування.

## I. ВСТУП

Під час експлуатації талевої системи канати зазнають дії розтягуючих та згинальних навантажень. Режими роботи канатів у складі талевої системи характеризуються високим рівнем низько- та високочастотних коливань і, як наслідок, значних динамічних навантажень. Дія знакозмінних згинальних моментів у перерізах канатів спричинюється великою кількістю перегинів їх віток на шківах талевої системи. Пряді талевих канатів є спіралеподібними елементами, що зазнають деформацій згину, кручення, розтягу і зминання, а у перерізах канатів виникають напруження овалізації та кручення. Зношування дротів прядей внаслідок тертя в місцях їх взаємного контактування, а також зношування зовнішніх елементів самого канату, що стикаються з поверхнею жолоба шківа та барабану, в достатній мірі теж можна віднести до втомних явищ. Перебуваючи впродовж всього терміну експлуатації під атмосферним впливом, талеві канати піддаються корозії, у результаті чого метал зазнає корозійно-втомних пошкоджень. Таким чином, дія знакозмінних навантажень та корозійні процеси призводять до появи й розвитку втомних та корозійно-втомних пошкоджень канатів, а за тривалої експлуатації в критичних моментах – до їх руйнування. Тому попередження таких негативних явищ можливе за наявності ефективної моделі оцінки їх довговічності.

## II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Напруження від розтягу та згину в перерізах канатів визначаються доволі точно. Що стосується визначення інших напружень та довговічності в цілому, то на даний час існує кілька моделей, які мають свої переваги та недоліки. Деякі актуальні аспекти довговічності сталевих канатів, питання зношування при різних умовах навантаження, наявності обірваних дротин, внаслідок поверхневого зношування розглянуті в роботах [1, 2]. Згідно деяких досліджень [3, 4] в процесі циклічних навантажень відбувається накопичення пластичних деформацій від циклу до циклу, причому закономірність накопичення деформації має монотонний характер. Довговічність в цьому випадку визначається із такого рівняння:

$$\sigma_0^m N_0 = \frac{\sigma_T e^{\alpha\sigma}}{CE} \left[ \ln\left(\frac{k}{1-k}\right) \left( \ln\left(\frac{W_*}{W_0} - 1\right) \right)^{-1} + 1 \right] \quad (1)$$

де  $\sigma_0$  – границя втоми матеріалу дротин;  $m$  – показник степеня рівняння кривої втоми;  $N_0$  – базове число циклів до руйнування;  $\sigma$  – середнє робоче напруження;  $\alpha$  – коефіцієнт середнього робочого напруження (для сталі  $\alpha = 0,5$ );  $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу;  $C$  – константа матеріалу;  $E$  – модуль пружності матеріалу;  $W_* = W/k$ ;  $W$  – величина прихованої (латентної) енергії деформації при  $0 < k < 1$ ;  $W_0$  – величина прихованої енергії, розсіяної в матеріалі за цикл при напруженнях, рівних границі втоми.

Виходячи із сумісного виникнення напружень у дротинах від циклічного розтягу та згинання на шківах і барабані, що викликають руйнування талевого канату, довговічність дротин, які знаходяться у зовнішньому шарі каната, авторами [5] запропоновано визначати із наступної залежності:

$$\sigma_0^m N_0 \geq \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left\{ \left( \frac{F_{m(n)}}{\sum A_i} + \frac{\delta \cdot E}{D_B + 2d_k} \right)^m + z_{\max} \left( \frac{F_{m(n)}}{\sum A_i} + \frac{\delta \cdot E}{D_{III} + 2d_k} \right)^m \right\} S_n, \quad (2)$$

де  $\sigma_0$  – границя втоми матеріалу дротин;  $m$  – показник степеня рівняння кривої втоми;  $N_0$  – базове число циклів до руйнування;  $n_{\max}$  – максимальне число свічок у бурильній колоні;  $F_{m(n)}$  – навантаження у ведучій вітці при підйомі бурильної колони із  $n$  свічок;  $\sum A_i$  – сумарна площа поперечного перерізу усіх дротин в канаті;  $\delta$  – діаметр дротини зовнішнього шару сталки;  $E$  – модуль пружності матеріалу дротин;  $D_B, D_{III}$  – діаметр барабана і шківів по дну жолоба відповідно;  $z_{\max}$  – максимальна кількість згинань, які має найбільш навантажена ділянка каната за один цикл спуску-підйому бурильної колони на висоту свічки;  $S_n$  – кількість спуско-підйомів.

Окрім номінальної міцності матеріалу дротин, номінального діаметра каната, авторами [6] при визначенні довговічності запропоновано враховувати також довжину пробігу каната по шківу:

$$\lg N = b_0 + \left( b_1 + b_4 \cdot \lg \frac{D_{III}}{d_k} \right) \left( \lg \frac{F_{\max}}{d_k^2} - 0,4 \cdot \lg \frac{\sigma_0}{1770} \right) + b_2 \cdot \lg \frac{D_{III}}{d_k} + b_3 \cdot \lg d_k + \frac{1}{b_5 + \lg \frac{l_{nk}}{d_k}}, \quad (3)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  – деякі константи (наприклад, для визначення кількості циклів до руйнування для канату конструкції Warrington-Seal 8×36 одностороннього звивання з металевим осердям мають наступні значення:  $b_0 = 1,381$ ;  $b_1 = 0,029$ ;  $b_2 = 6,241$ ;  $b_3 = -0,321$ ;  $b_4 = -1,613$ ;  $b_5 = 1,2$ ;  $\sigma_0$  – номінальна міцність дротини;  $F_{\max}$  – максимальна сила розтягу каната;  $D_{III}, d_k$  – діаметр шківів по дну жолоба та діаметр канату відповідно;  $l_{nk}$  – довжина пробігу каната по шківу.

Основним фактором, що лімітує довговічність талевого каната в моделях (1), (2), (3) є циклічно повторювані напруження згину в дротах каната при проходженні останнього через шківів талевого блоку й крон-блока та при навивці на барабан лебідки. Спільна дія напружень у дротинах від циклічно повторюваного осьового навантаження

розтягу і від вигину на шківів та барабані викликають втому й зношування дротин, що приводить до їхнього руйнування [7]. Окремої уваги заслуговують визначення довговічності талевих канатів з урахуванням фретинг-корозії [8]. У простих випадках осьові та згинальні напруження з достатнім ступенем точності можуть бути визначені аналітичними методами. Повну ж картину напружено-деформованого стану за умов фретинг-корозії та фретинг-зношування можливо оцінити з використанням чисельного аналізу.

### III. ВИСНОВКИ

Побудова адекватної моделі оцінки довговічності талевих канатів можлива при використанні аналітичних методів і чисельного аналізу із однієї сторони та різних моделей фретинг-зношування за експериментальними даними – з іншої. Це дозволить встановити залежності зношування й швидкості руйнування від кількості циклів навантаження каната, що у свою чергу дасть можливість спрогнозувати появу та розвиток критичних пошкоджень в канатах талевої системи й забезпечити їх нормування при заданих експлуатаційних умовах.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Chang X.-D. Experimental investigation of mechanical response and fracture failure behavior of wire rope with different given surface wear. *Tribol. Int.* Elsevier, 2018, vol. 119, pp. 208-221
- [2] Peng Y. The friction and wear properties of steel wire rope sliding against itself under impact load. *Wear.* Elsevier, 2018, vol. 400-401, pp. 194-206.
- [3] Грабовський А.П., Бабієнко І.І., Бондарець О.А. Кінетика накопичення пошкоджень при повторно-змінному осьовому навантаженні конструкційних матеріалів. Серія машинобудування. Вісник НТУУ “КПІ”, 2013. №3 (69) С. 18-23.
- [4] Гриджук Я.С. Кінетичний потенціал колони насосно-компресорних труб як енергетичний критерій втомної міцності її елементів. *Науковий вісник ІФНТУНГ.* 2015. №1(38). С. 70-76.
- [5] Івашенко В.Т., Лях М.М., Журавльов Д.Ю., Михайлів В.В. Фактори, що впливають на вихід з ладу талевого канату бурових установок. *Прикарпат. вісн. НТШ.* 2017. № 2. С. 292-300.
- [6] Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear.* Elsevier, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.
- [7] M. Young, “The Technical Writer's Handbook. Mill Valley,” CA: University Science, 1989.
- [8] Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів. Монографія. К.: ЦП „Компрінт”, 2015. 197 с.
- [8] Waterhouse R. B. *Fretting Corrosion.* Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig : Pergamon Press, 1972. 253 p.

# Спосіб формалізації та метод розв'язання багатокритеріальної задачі комівояжера

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.091>

Євген Івохін  
Факультет комп'ютерних наук та кібернетики  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка  
Київ, Україна  
[ivohin@univ.kiev.ua](mailto:ivohin@univ.kiev.ua)

Костянтин Юштин  
Факультет комп'ютерних наук та кібернетики  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка  
Київ, Україна  
[gkons@mail.univ.kiev.ua](mailto:gkons@mail.univ.kiev.ua)

Андрій Улеєв  
Факультет транспортних та інформаційних технологій  
Національний транспортний університет  
Київ, Україна  
[uleiev.a@gmail.com](mailto:uleiev.a@gmail.com)

**Анотація** – У статті розглянуто один зі способів формалізації двокритеріальної задачі комівояжера та метод знаходження компромісного розв'язку за умови антагоністичності критеріїв задачі. Для розв'язання задачі комівояжера з багатьма критеріями розроблено алгоритм, який використовує алгоритмічне визначення компромісу. Описано схему застосування алгоритму на основі запропонованої модифікації методу Пріма. Проведено аналіз отриманих результатів, визначено напрямок подальшого розвитку запропонованої методики.

**Ключові слова** – задача комівояжера, двокритеріальна задача, алгоритм Пріма, схема знаходження компромісу, алгоритмічний підхід

## I. ВСТУП

Розв'язання сучасних проблем логістики передбачає аналіз і оптимізацію логістичних операцій, включаючи планування, координацію та контроль руху та зберігання товарів, послуг і інформації, оптимізацію потоків у мережі [1-2]. Завдяки методам і моделям імітаційного моделювання можна створювати комп'ютерні моделі логістичної системи та використовувати їх для тестування різних сценаріїв та оптимізації продуктивності системи.

Однією з найбільш відомих оптимізаційних задач комбінаторного типу є задача комівояжера, зміст якої полягає у необхідності скласти маршрут руху в рамках заданої сукупності зв'язаних між собою пунктів (міст), що утворюють транспортну мережу конкретного регіону [3]. Комівояжеру необхідно скласти маршрут, за яким він має відвідати усі міста мережі з урахуванням критерію, за яким відстань, яку потрібно подолати, або час подолання були мінімальними. Особливістю задачі є те, що маршрут повинен проходити через усі пункти, причому, кожен з пунктів потрібно відвідати не більше одного разу.

Залучення математичних підходів для розв'язування логістичних задач набуває широкого впровадження, конкретний зміст якого залежить від

характеру проблеми та наявних даних. Іноді виникають і потребують дослідження та розв'язання нетипові постановки класичних задач, однією з яких є задача комівояжера.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА ТА АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЇЇ УЗАГАЛЬНЕННЯ

Задача комівояжера - комбінаторна задача, для розв'язання якої можна використовувати методи математичного програмування. Для визначеності можна пронумерувати міста числами  $(1, 2, 3, \dots, n)$ , тоді маршрут комівояжера визначається циклічною перестановкою номерів  $t = (j_1, j_2, \dots, j_n, j_1)$ , де  $j_i \in \overline{1, n}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , причому усі номери  $j_1, \dots, j_n$  - різні. Будь-яка перестановка з номерів, яка подана у такому вигляді, представляє можливий розв'язок задачі, а отже, існує  $(n-1)!$  можливих шляхів для побудови його маршруту. Проблема комівояжера полягає в тому, щоб вибрати оптимальний з точки зору довжини або тривалості подорожі маршрут, який задовольняє деяким заданим обмеженням.

Сукупність міст мережі можна розглядати у вигляді вершин деякого графу з заданими відстанями (або часом пересування) між усіма парами вершин  $r_{ij}$ , які утворюють матрицю  $R = \{r_{ij}\}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ . Вважаємо матрицю симетричною. Тоді формальне завдання полягає у тому, щоб знайти найкоротший маршрут (за часом або довжиною), який проходить через кожне місто та закінчується в точці відправлення.

Змінними задачі є елементи бінарної матриці переходів між вершинами  $X = \{x_{ij}\}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ , які дорівнюють 1, якщо у побудованому маршруті для задачі присутнє ребро  $(v_i, v_j)$ , 0 - у іншому випадку. Оптимальним є найкоротший за відстанню або за часом маршрут:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n r_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

з обмеженнями

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} = 1, i = \overline{1, n},$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n x_{ij} = 1, j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$v_i - v_j + nx_{ij} \leq n - 1, 1 \leq i \neq j \leq n.$$

Зрозуміло, що проблема розв'язання задачі (1), (2) з метою знаходження оптимального маршруту представляє собою класичний варіант постановки задачі комівояжера, при вирішенні якої в якості критерію окрім згаданих вище можуть розглядатися вартість перевезень (проїзду), ефективність руху за маршрутом з урахуванням обсягу або ваги вантажних перевезень, тощо. Характерною рисою усіх таких задач є наявність лише одного критерію оптимальності вибору маршруту.

Одним з варіантів двокритеріальної задачі комівояжера є задача пошуку оптимального за довжиною та тривалістю проїзду маршруту на основі одночасного застосування критеріїв виду (1).

Дво- та багатокритеріальні задачі комівояжера можуть виникати й у інший спосіб. Припустимо, що у традиційній постановці задачі додатково формулюється умова щодо визначеного порядку проїзду на заданій мережі, наприклад, у вигляді першочерговості відвідування (за маршрутом конкретно визначений вузол  $i$  має обов'язково передувати іншому заданому вузлу  $j$ ). Така вимога не суттєво ускладнює процес розв'язання задачі, для чого у методах потрібно лише вибракувувати усі розв'язки, в яких не виконується згадана умова.

### III. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Серед різних узагальнених постановок задачі комівояжера варто приділити увагу задачам з декількома критеріями оптимальності. Розглянемо для визначеності задачу комівояжера з двома критеріями, у яких будемо мінімізувати сумарну відстань та час переміщення за маршрутом. Іншими словами, у постановці задачі комівояжера (1), (2) замість єдиного критерію визначимо два інших

$$F_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де величини  $d_{ij}$  та  $t_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ , є елементами відповідних матриць  $D = \{d_{ij}\}$ , та  $T = \{t_{ij}\}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ , які визначають відстані та час переміщення між усіма парами вершин транспортної мережі.

Використання двокритеріальної задачі додатково ускладнює процес розв'язання задачі комівояжера. Виникають питання щодо формулювання у цьому випадку поняття ефективного розв'язку за умови антагоністичності сформульованих критеріїв та застосування методів розв'язування відповідної задачі.

Завданням дослідження є розробка методики для формалізації способів розв'язання двокритеріальної задачі комівояжера на основі модифікації критеріальних функцій шляхом їх зведення до одного критерія [4] або застосування алгоритмічного підходу.

### IV. ЗАПРОПОНОВАНИЙ АЛГОРИТМ

Дійсно, за наявності різних оптимальних маршрутів у задачі комівояжера за окремих критеріїв, які визначаються у вигляді відповідних послідовностей вузлів мережі, формулювання компромісної послідовності буде вимагати створення правил врахування величин заданих критеріїв та схем модифікації сукупності розв'язків з метою визначення номерів етапів компромісного маршруту. Іншими словами, у цьому випадку потрібно вирішити завдання щодо визначення методики переформатовування (зміни) наявних оптимальних послідовностей з метою узгодження величин критеріїв якості маршруту.

Розглянемо підхід, на базі якого можна провести цілеспрямовані перестановки у послідовностях, що складаються з деякої множини вузлів.

Припустимо, що в багатокритеріальній задачі комівояжера розглядається  $l$  критеріїв. Для кожного з них отримано оптимальні маршрути у вигляді послідовностей  $p_k$ ,  $k = \overline{1, l}$ . Вважаємо, що усі маршрути відповідають обмеженням задачі: починаються й завершуються в одному вузлі та складаються з номерів вузлів, що не повторюються.

Без обмеження конструктивності можна припустити, що послідовності містять неспівпадаючі між собою підпослідовності (принаймні, одну), які складаються з однієї й тієї ж сукупності вузлів. Такі послідовності описують можливі маршрути переміщень на відповідній множині вузлів. Зрозуміло, що початковий і кінцевий вузли в усіх підпослідовностях мають бути однаковими, але їх номери не повинні між собою співпадати. Остання вимога актуальна лише для повної послідовності вузлів транспортної мережі: у цьому випадку розглядаються підпослідовності без кінцевої вершини, що містять усі номери вузлів мережі, але такі, в яких співпадають передостанні номери. Зауважимо, що за умови неспівпадіння цих номерів знайти компромісний маршрут за допомогою даного підходу неможливо.

Таким чином, будемо вважати, що маємо деяку сукупність номерів вузлів мережі  $q = \{q_1, q_2, \dots, q_s\}$ , з яких утворюються різні послідовності, що є частинами оптимальних

маршрутів комівояжера при різних критеріях  $p_k$ ,  $k = \overline{1, l}$ . Правила перестановки з метою погодження величин критеріїв залишаються невизначеними, а повний перебір неможливий навіть при досить невеликих наборах вузлів (наприклад, при  $s > 20$ ).

Тоді можна розглядати компроміс у вигляді послідовності, яку буде отримано в результаті використання деякого додаткового алгоритму, який відноситься до класу комбінаторних оптимізаційних методів і за змістом відповідає постановці вихідної задачі. Для задачі комівояжера в якості такого алгоритму може бути використаний алгоритм на основі методу Пріма [5], який дозволяє побудувати мінімальне кістякове дерево (остов) зваженого зв'язного неорієнтованого графу.

Потрібно зауважити, що формальне застосування алгоритму Пріма не дозволяє визначити маршрут без повторень. Для використання методу Пріма в якості алгоритму для пошуку компромісу накладемо умову, аналогічну умові задачі комівояжера. Отже, будемо шукати маршрут на остовному підграфі транспортної мережі, пункти відвідування в якому не повторюються.

Отриманий в результаті роботи запропонованого алгоритму маршрут на множині вузлів  $q$  будемо вважати частиною компромісного маршруту в багатокритеріальній задачі комівояжера і називати побудований у такий спосіб розв'язок задачі *алгоритмічно* компромісним, підкреслюючи його залежність від застосованого при обчисленні методу.

Запропонований підхід не завжди дозволяє побудувати шуканий маршрут у підграфі. При побудові остовного дерева часто має місце невелика кратність вузлів, в наслідок чого формування шляхів, що відрізняються від отриманих за окремими критеріями маршрутів, неможливе.

Для такого випадку вихід було знайдено у збільшенні кількості вузлів підграфу, який подається на вхід алгоритму. Послідовність для пошуку компромісу можна розширити хоча б одним вузлом, додавши його спочатку або у кінці з відповідних пар підпослідовностей, які співпадають.

Для аналізу ефективності роботи алгоритму було проведено обчислювальні експерименти на прикладі розв'язання задачі комівояжера з двома критеріями на транспортній мережі з 11 пунктів [6]. Проведено аналіз отриманих результатів.

Потрібно зауважити, що вигляд алгоритмічного компромісного розв'язку залежить від обраного

алгоритму для знаходження альтернативи на ділянках неспівпадіння послідовностей та від вигляду цільової функції, що розглядається на відповідній підпослідовності. Але такий підхід повністю відповідає методиці пошуку компромісних рішень у багатокритеріальних неперервних і дискретних задачах оптимізації, в яких остаточний вигляд компромісу на заданій множині альтернатив визначається методом його пошуку.

#### ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто спосіб формалізації двокритеріальної задачі комівояжера та спосіб знаходження компромісного розв'язку за умови антагоністичності критеріїв. Для розв'язання отриманої задачі запропоновано алгоритм, що базується на алгоритмічному обчисленні компромісу. Описано схему застосування алгоритму на основі розробленої модифікації методу Пріма, що дозволило отримати конструктивну процедуру розв'язання двокритеріальної задачі комівояжера. Наведено результати роботи алгоритму для знаходження компромісних розв'язків задачі комівояжера за критерієм мінімізації тривалості руху та додаткової вимоги щодо порядку переміщення, проведено аналіз отриманих результатів. Зроблено висновки, запропоновано подальший розвиток запропонованої методики для розв'язання нечіткої задачі комівояжера [7] з багатьма критеріями.

#### REFERENCES

- [1] Martin Christopher. Logistics and Supply Chain Management. - FT Publishing International, 5th edition, 2016. – 328 p.
- [2] Alan Harrison, Remko van Hoek. Logistics Management and Strategy. - Financial Times Management, 2nd edition, 2005. – 308 p.
- [3] Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. - К.: Видавничий дім «Слово», 2006. – 816с.
- [4] Івохіна К.Е., Гавриленко В.В. Про один метод розв'язання задачі комівояжера з двома критеріями // Тези I міжнародної науково-практичної конф. «Штучний інтелект та інформаційні технології», Київ, КНУХТ, 3-4 червня 2024. - С.230-232.
- [5] Ajay D. Kshemkalyani, Mukesh Singhal. Distributed Computing: Principles, Algorithms, and Systems. - Cambridge University Press, 2011. – 414 p.
- [6] Ivohin E. V., Gavrylenko V. V., Ivohina K. E. On the recursive algorithm for solving the traveling salesman problem on the basis of the data flow optimization method // Radio Electronics, Computer Science, Control. - 2023. - № 3. – P. 141-147.
- [7] Юштин К.Е., Івохін Е.В. Про вплив способів дефазифікації на результати розв'язання нечіткої задачі комівояжера // Штучний інтелект. - 2024. - №1 (96). - P.93-103..



# Оптимальне керування переносом вологи у трапецієвидному пористому середовищі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.092>

Дмитро Ключин

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики,  
Київський національний університет імені Тараса  
Шевченка  
Київ, Україна  
dmytroklyushin@knu.ua

Сергій Ляшко

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики,  
Київський національний університет імені Тараса  
Шевченка  
Київ, Україна  
sergiylyashko@knu.ua

Андрій Тимошенко

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики,  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Київ, Україна  
andriitymoshenko@knu.ua

**Анотація** – У статті запропоновано підхід для знаходження оптимальної потужності занурених у пористе середовище джерел для квазілінійного рівняння Річардса в трапецієвидній області. Застосовується перетворення Кірхгофа з введеним масштабуванням координат і потужностей занурених джерел, що дозволяє сформулювати безрозмірну задачу. Завдання цього дослідження полягає в тому, щоб знайти потужність занурених джерел – таку, щоб розподіл вологи в кінцевий момент часу був близьким до заданих значень або заданої цільової функції.

**Ключові слова** – рівняння Річардса; керування; оптимізація; пористі середовища; перенесення вологи.

## I. ВСТУП

Рівняння Річардса у нелінійній формі продовжує бути об'єктом досліджень через його складність. Огляд деяких підходів пов'язаних розв'язанням близьких до рівняння задач, можна знайти наприклад, у Y. Zha, J. Yang, J. Zeng, C.-H. M. Tso, W. Zeng, L. Shi [1]. У випадку перемінно насиченої течії в неоднорідних пористих середовищах із шарами різних властивостей H. Suk, E. Park [2] запропонували чисельний метод розв'язання, який застосовується після перетворення Кірхгофа.

Дослідження K. Kumar, F. List, I. Pop, F. Radu [3] включає перелік ефективних моделей, ефективність яких було підтверджено чисельними розрахунками для опису течії у ненасиченому пористому середовищі, що містить тріщину. Нелінійний розв'язок рівняння Річардса за допомогою заміни змінних, зокрема, введення фіктивної змінної, запропонований S. Bassetto, C. Cancas, G. Enchery, Q. H. Tran [4].

Кілька методів неявної та напівнеявної часової дискретизації були досліджені в S. Keita [5] з другим порядком точності, використовуючи формули

екстраполяції та апроксимації рядами Тейлора для нелінійних членів часової дискретизації.

Часто рівняння Річардса розв'язують за допомогою локальних методів, зокрема, методу скінченних різниць, скінченних елементів і скінченних об'ємів [6], [7] із застосуванням ітераційних методів типу Ньютон.

Тому дослідження рівняння Річардса продовжуються і зараз, про що свідчать наведені вище наукові результати.

## II. ДВОВИМІРНА ЗАДАЧА

Розглянемо математичну модель перенесення вологи для області ґрунту  $\Omega = \{(x, y) : 0 < x < l_1, 0 < y < l_2\}$ , де  $l_1$  і  $l_2$  — ширина і глибина відповідно з початковою вологістю близькою до 0, фіксованою вологістю на межі та визначеним цільовим розподілом вологості у кінцевий момент часу  $\varphi(x, y)$ . Рідину вважаємо нестискуваною, а тиск на систему постійним.

Модель представлена рівнянням Річардса з межовими умовами першого роду:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x(\omega) \frac{\partial H}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y(\omega) \frac{\partial H}{\partial y} \right] = \sum_{m=1}^M Q_m F(x - x_m, y - y_m) \quad (1)$$

$$(x, y) \in \Omega, t \in (0, T];$$

$$\omega|_{\partial\Omega} = \omega_0, \quad \omega|_{t=0} = \omega_0. \quad (2)$$

У цьому рівнянні  $\omega$  — позначає вологість,  $\omega_0$  — неусувну вологість,  $H = \psi(\omega) - y$  — напір,

$K_x(\omega)$  — водопроникність вздовж осі  $Ox$ ,  
 $K_y(\omega)$  — водопроникність вздовж осі  $Oy$ ,  
 $F(x - x_m, y - y_m) \in L_2((0, T) \times \Omega)$  — функція, що задає вплив на систему джерела, розташованого в точці  $(x_m, y_m)$ . Для функції дифузійності уздовж осі  $Oy$  обрано  $D_y(\omega) = K_y(\omega) \frac{d\psi}{d\omega} = e^{0.5\omega}$ .

У правій частині рівняння (1) задано сукупність джерел відомої потужності  $Q_m$ , де  $0 \leq Q_m \leq Q_{\max}, m = 1, \dots, M$ . Розглядається задача лише для ненасиченого випадку.

Припустимо, що водопроникність за осями представляється у вигляді  $K_x(\omega) = k_1 \cdot k(\omega)$ ,  $K_y(\omega) = k_2 \cdot k(\omega)$  де  $k_1, k_2$  коефіцієнти вологопровідності уздовж осей  $Ox, Oy$  а  $k(\omega)$  — вологопровідність. Не обмежуючи загальності, покладемо  $k_1 = k_2$ .

Виконаємо координатний перехід до області  $\Omega_0 = \{(\xi, \zeta) : 0 < \xi < 1, 0 < \zeta < 1\}$  та масштабуємо потужності джерел для простоти обчислень  $q_j = \frac{Q_j}{Q}$ . Застосувавши перетворення Кірхгофа вигляду

$$\Theta(\omega) = \frac{4\pi k_1}{Q k_2 \beta_2} \int_{\omega_0}^{\omega} D_y(\omega) d\omega \quad (3)$$

можемо перейти до рівняння вигляду:

$$L(\Theta) \equiv \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \zeta^2} + 2 \frac{\partial \Theta}{\partial \zeta} = \sum_{m=1}^M q_m \cdot F(\xi - \xi_m, \zeta - \zeta_m) \quad (4)$$

$$\Theta|_{\partial\Omega_0} = 0, \quad \Theta|_{\tau=0} = 0. \quad (5)$$

### III. ЧИСЕЛЬНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗАДАЧІ

Використаємо підхід скінченних різниць для представлення задачі з точки зору значень вологості у точках області. Враховуючи трапецієвидну форму, для точок на бокових границях в залежності від того, верхня чи нижня частина області є більшою, може бути відсутня точка нижче або вище від даної. Враховуючи це, підхід застосований у попередніх дослідженнях [7] було модифіковано відповідно до форми області. Всього можна виділити такі випадки розташування: всередині області, на лівій границі, на правій границі, на нижній чи верхній границі та у

кутах. Для кожного з них було використано своє різнищеве представлення рівняння з подальшим вираженням наступного кроку ітераційного процесу обчислень через попередній.

Знаючи поточне наближення потужності джерел, будемо намагатись оптимізувати його щоб мінімізувати середньоквадратичне відхилення значень вологості у точках

$$\Theta_{i,j}^n = \Theta \left( \frac{i}{20}, \frac{j}{20}, n \cdot 10^{-4} \right), \quad i, j = 0, \dots, 20, \quad \text{на}$$

кожному часовому кроці  $n = 1, \dots, N$ , враховуючи відомий розподіл вологи на границях та у початковий момент часу. Тоді рівняння всередині області має вигляд:

$$\frac{\Theta_{ik}^{n+1} - \Theta_{ik}^n}{\tau} = \frac{\Theta_{i+1k}^n - 2\Theta_{ik}^n + \Theta_{i-1k}^n}{h^2} + \frac{\Theta_{ik+1}^n - 2\Theta_{ik}^n + \Theta_{ik-1}^n}{h^2} - 2 \frac{\Theta_{ik+1}^n - \Theta_{ik-1}^n}{2h} + \sum_{m=1}^M F(\xi - \xi_i, \zeta - \zeta_k) \cdot q_m; \quad \Theta_{ik}^0 = 0.$$

Для випадку постановки задачі з умовою непроникності на границях при виведенні відповідних рівнянь використано наступні підходи до заміни похідних:

- Для точок верхньої границі по горизонталі заміна аналогічна до середини області, по вертикалі враховано точку(и) що знаходяться нижче.
- Для точок нижньої границі по горизонталі заміна аналогічна до середини області, по вертикалі враховано точку(и) що знаходяться вище.
- Для точок лівої похилої границі по вертикалі заміна враховує точку(и) над даною якщо верхня границя більша за нижню та під нею якщо навпаки. По горизонталі враховуємо значення вологості у точках праворуч.
- Для точок правої похилої границі по вертикалі заміна враховує точку(и) над даною якщо верхня границя більша за нижню та під нею якщо навпаки. По горизонталі враховуємо значення вологості у точках ліворуч.

Рівняння записуються та класифікуються відповідно до сіткового представлення області. При цьому загальний оптимізаційний підхід співпадає з випадком прямокутної області: побудувати пряму задачу, спряжену задачу та уточнюючий крок, детально описаний у наших інших роботах.

### IV. ТРАПЕЦІЄВИДНА ОБЛАСТЬ ЯК ПРИКЛАД

У даному дослідженні рівняння виводились для області, зображеної на Рис. 1 з врахуванням вище згаданого підходу. Різним кольором позначено точки відповідно до класифікації, для кожної групи використано своє рівняння.

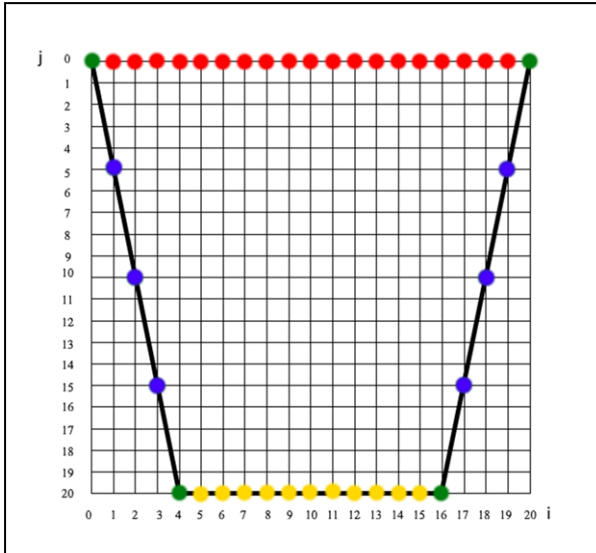


Рис.1 Приклад області, використаний для дослідження

Отже, даний підхід дозволяє застосувати методику аналізу оптимальної потужності джерел [7] до випадку трапецієвидної області з урахуванням її особливостей.

- [1] 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. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 6 issue 5. 2019. <https://doi.org/10.1002/wat2.1364>
- [2] H. Suk, E. Park, Numerical solution of the Kirchhoff-transformed Richards equation for simulating variably saturated flow in heterogeneous layered porous media. *Journal of Hydrology*, vol. 579. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124213>
- [3] K. Kumar, F. List, I. Pop, F. Radu, Formal upscaling and numerical validation of fractured flow models for Richards equation. *J. Comput. Phys.* vol. 407. 2019.
- [4] S. Bassetto, C. Cances, G. Enchery, Q. H. Tran, Robust Newton solver based on variable switch for a finite volume discretization of Richards equation, In: *Finite Volumes for Complex Applications IX - Methods, Theoretical Aspects, Examples*, 2020, pp. 385-393.
- [5] S. Keita, A. Beljadid, Y. Bourgault, Implicit and semi-implicit second-order time stepping methods for the Richards equation. *Advances in Water Resources*, vol. 148. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05224>
- [6] V.M. Bulavatsky, V.O. Bohaienko Boundary-value problems for space-time fractional differential filtration dynamics in fractured-porous media. *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 58. pp. 358–371, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00468-9>
- [7] S. Lyashko, D. Klyushin, A. Tymoshenko Optimal control over inserted point source intensity for humidification of a two-dimensional porous medium. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, vol. 12. 2024, pp. 13–18. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.12.013>

# Математична модель нелінійної неізометричної фільтрації з умовами спряження

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.093>

Петро Мартинюк

Національний університет водного господарства та  
природокористування  
Рівне, Україна  
p.m.martyniuk@nuwm.edu.ua

Оксана Остапчук

Національний університет водного господарства та  
природокористування  
Рівне, Україна  
o.p.ostapchuk@nuwm.edu.ua

Ольга Мічута

Національний університет водного господарства та  
природокористування Рівне, Україна  
o.r.michuta@nuwm.edu.ua

Олег Мельничук

Національний університет водного господарства та  
природокористування Рівне, Україна  
melnychuk.o\_ak21@nuwm.edu.ua

**Анотація** – Запропоновано вдосконалити математичну модель процесу пружної фільтрації в пористому середовищі із тонким слабопроникним включенням. Вдосконалення полягають в урахуванні впливу неізотермічності процесу фільтрації на утримуючий градієнт напорів. Утримуючий градієнт напорів, як один із параметрів нелінійного закону Дарсі в слабопроникних пористих середовищах, є залежним від температури. Сформовано відповідну крайову задачу. Її числовий розв’язок знайдено методом скінченних елементів. Особлива увага приділена програмній реалізації числового розв’язання нелінійної крайової задачі в неоднорідному середовищі.

**Ключові слова**—нелінійний закон Дарсі; утримуючий градієнт напорів; температура; тонке включення; числові методи; Python

## I. ВСТУП

В роботах [1-8] побудовано та чисельно досліджено математичні моделі фільтраційної консолидації в пористих середовищах із тонкими слабопроникними включеннями. Особливістю моделей є, по-перше, наявність умов спряження та можливість розриву розв’язків відповідних крайових задач. А також, по-друге, врахована можлива зміна фільтраційних характеристик матеріалу тонкого включення від фізико-хімічного стану порової рідини. В такому випадку умови спряження набувають неklasичного, інтегрального вигляду.

Якщо розглядати тонкі включення як спеціальні, штучно створені в процесі людської діяльності, то їх найчастіше роблять із глинистих матеріалів. Глина – один із природних пористих матеріалів, для якого закон Дарсі набуває явно вираженого нелінійного характеру. В роботі [5] враховано і досліджено ефект нелінійності в законі Дарсі, а також ефект

модифікації умов спряження на тонкому слабопроникному включенні. При цьому в роботі доведено існування, єдиність та встановлено точність наближеного узагальненого розв’язку відповідної нелінійної крайової задачі.

Тонкі геобар’єри застосовуються як захисні елементи в сховищах твердих побутових відходів. В процесі біодеградації органічних решток сховища відходів стають джерелами тепла [9, 10]. В результаті виникає актуальна задача дослідження впливу температури на нелінійні ефекти в законі Дарсі. Основою для урахування таких ефектів в математичних моделях є натурні експерименти, проведені в роботах [10, 11].

У багатьох випадках, процес фільтрації підпорядковується нелінійним рівнянням, серед яких основним є рівняння Дарсі. Через складність цих рівнянь та граничних умов, найефективнішим способом їх вирішення є чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів (МСЕ). Цей метод дозволяє розбивати складні області на невеликі елементи (власне, що і стало основою для назви методу), які є носіями відповідних поліноміальних базисних функцій. Як свідчить багаторічний досвід застосувань, МСЕ забезпечує точність результатів навіть при складних граничних умовах та нелінійних залежностях.

Метод скінченних елементів є потужним інструментом для моделювання задач фільтрації, в неоднорідних середовищах [12]. Адаже в його основі лежить теорія методу Бубнова-Гальоркіна, як одного з проєкційних методів, який дозволяє шукати наближені узагальнені розв’язки крайових задач. Перехід від «класичного» до «узагальненого» розв’язку забезпечує можливість строгого

теоретичного обґрунтування та можливість розривів на тонких слабопроникних включеннях.

Ключовим аспектом роботи є не лише математична модель, але й її програмна реалізація з використанням мови програмування Python та бібліотек NumPy, SciPy для чисельних розрахунків. Це дозволить ефективно вирішувати задачі нелінійної неізотермічної фільтрації та краще зрозуміти вплив температури на фільтрацію, що допоможе в прикладних задачах різних галузей.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Розглянемо задачу для полігону захоронення твердих побутових відходів. Область  $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$  (рис. 1) описує двошаровий ґрунтовий масив, який знаходиться в основі сховища твердих побутових відходів. У цій області присутній геобар'єр  $\omega$ , виконаний з тонкого шару геосинтетичного матеріалу, товщиною  $d$ , який знаходиться на глибині  $x = \xi$ . Геобар'єри використовуються для захисту підземних вод від проникнення забруднюючих речовин із полігону, однак внаслідок біохімічних процесів у полігоні відбувається підвищення температури [9]. Оскільки геобар'єр, як тонке включення, формується із слабопроникних геоматеріалів, то в класичному законі Дарсі починають проявлятися нелінійні ефекти. В сформованій нижче математичній моделі такі нелінійні ефекти враховано через наявність порогового градієнта напору. Величина даного порогового градієнта напору обернено пропорційна до значень проникності пористого середовища (див. роботу [5] та наведений там огляд). Однак, як показано в роботах [10, 11] його значення також залежать і від теплового стану пористого середовища. Саме це і враховано в математичній моделі.

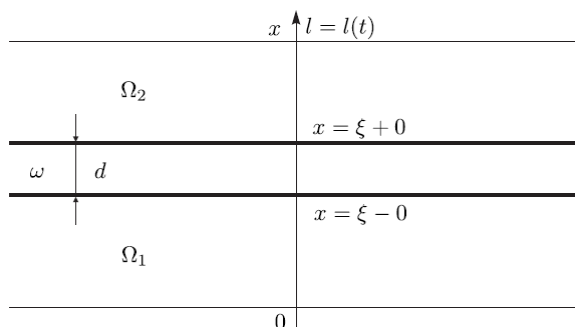


Рис. 1. Шар ґрунту товщиною  $l$  з тонким включенням  $\omega$  товщиною  $d$

Висока температура та зміни вологісного режиму можуть впливати на фільтраційні властивості ґрунту і створювати нерівномірний розподіл напорів, що підвищує ризик виникнення небезпечних ситуацій, таких як розгерметизація полігону.

Задача полягає в тому, щоб змоделювати процес консолідації повністю насиченого пористого середовища з геобар'єром в умовах підвищення температури та врахувати ефекти термоосмосу. Необхідно визначити розподіл напорів  $h(x,t)$  і

температури  $T(x,t)$  в товщі пористого середовища, а також врахувати вплив температурних змін на процес фільтрації рідини та термоосмотичні явища в ґрунті [13].

Сформульована вище фізична постановка задачі описується крайовою задачею для системи двох квазілінійних параболічних рівнянь і містить наступні залежності:

1) Рівняння фільтраційної консолідації для змінної температури з урахуванням термоосмосу

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1+e}{\gamma a} \frac{\partial}{\partial x} \left( k(h,T) \frac{\partial h}{\partial x} + \mu(h) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$x \in \Omega_1 \cup \Omega_2, \quad t > 0;$$

де

$h(x,t)$  – напір в поровій рідині;

$T(x,t)$  – температура;

$k(x,t)$  – коефіцієнт фільтрації, що залежить від тиску та температури;

$\mu(h)$  – термоосмотичний коефіцієнт;

$e$  – коефіцієнт пористості ґрунту;

$\gamma$  – питома вага порової рідини;

$a$  – коефіцієнт стискуваності ґрунту.

2) Граничні умови для напору на лівій межі:

$$h(x,t)|_{x=0} = h_0(t), \quad t \geq 0; \quad (2)$$

на правій межі:

$$u(x,t)|_{x=l} = \left( -k(h,t) \frac{\partial h}{\partial x} - \mu(h) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=l} = 0, \quad (3)$$

3) Початкова умова для напору

$$h(x,0) = h_0(x), \quad x \in \Omega_1 \cup \Omega_2; \quad (4)$$

4) Рівняння теплопровідності

$$c_s(h) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(h) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho_w c_w u(h,t) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (5)$$

$$x \in \Omega_1 \cup \Omega_2, \quad t > 0;$$

де

$c_s(h)$  – об'ємна теплоємність ґрунту;

$\lambda(h)$  – коефіцієнт теплопровідності, що залежить від напору.

5) Граничні умови для температури на лівій межі:

$$T(x,t)|_{x=0} = T_0(t), \quad t \geq 0; \quad (6)$$



на правій межі:

$$q_T(x,t)|_{x=l} = \lambda(h) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \quad t \geq 0; \quad (7)$$

6) Початкова умова для температури

$$T(x,0) = T_0(x), \quad x \in \Omega_1 \cup \Omega_2; \quad (8)$$

7) Умови спряження на тонкому включенні (геобар'єрі) для напору:

$$u^\pm \Big|_{x=\xi} = - \frac{[h]}{d \int_0^d \frac{dx}{k_\sigma(h,T)}}; \quad (9)$$

для температури:

$$q_T^\pm \Big|_{x=\xi} = - \frac{[T]}{d \int_0^d \frac{dx}{\lambda_\sigma(h)}}; \quad (10)$$

де  $[h]$ ,  $[T]$  – стрибки напору та температури на межі включення;

$k_\sigma(h,T)$ ,  $\lambda_\sigma(h)$  – коефіцієнти фільтрації та теплопровідності на геобар'єрі;

$d$  – товщина геобар'єру.

Питання якісної теорії задач подібного типу розглянуті, наприклад, в роботі [12].

### III. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ В НЕЛІНІЙНИХ НЕІЗОМЕТРИЧНИХ ЗАДАЧАХ ФІЛЬТРАЦІЇ З УМОВАМИ СПРЯЖЕННЯ

Для розробки програми використана мова програмування Python так, як вона має певні переваги над іншими, а саме:

1. Простота використання: легкий для вивчення синтаксис, що дозволяє швидко розробляти програми. Python також має вбудовану документацію та допомогу, що допомагає вирішувати проблеми.
2. Розширюваність: Python має велику кількість сторонніх бібліотек та фреймворків, що дозволяє швидко створювати програми з багатою функціональністю.
3. Кросплатформність: Python підтримується на багатьох платформах, включаючи Windows, macOS, Linux, Android та iOS, що дозволяє розробляти крос-платформні додатки.
4. Велика спільнота: Python має велику та активну спільноту програмістів, яка надає безкоштовну допомогу та ресурси для вивчення мови та розробки програм.
5. Швидкість розробки: дозволяє швидко розробляти програми та зосереджуватися на функціональності програми, замість зайнятості технічними деталями.

6. Простота інтеграції: можливість легко інтегруватися з іншими мовами програмування та зовнішніми додатками.

Також для графічного інтерфейсу використано фреймворк QT, переваги якого полягають в наступному:

1. Підтримка крос-платформної розробки: QT підтримується на різних платформах, включаючи Windows, macOS, Linux, Android та iOS, що дозволяє створювати крос-платформні додатки на Python.
2. Функціональність: має велику кількість готових компонентів, які дозволяють швидко створювати складні інтерфейси користувача. QT також має вбудовану підтримку віджетів, графіки, мультимедіа та мережевого програмування.
3. Зручність використання: дружній та легкий для вивчення API, що дозволяє програмістам швидко розробляти програми. QT також має велику документацію та підтримку спільноти, що допомагає розробникам вирішувати проблеми.
4. Широкі можливості налаштувань: має велику кількість параметрів, які дозволяють розробникам налаштувати різні елементи інтерфейсу користувача, включаючи кольори, шрифти та розміри.

Перед реалізацію потрібно було визначитися з IDE, де можна розробляти такий проєкт. Проаналізувавши найпопулярніші середовища розробки, було обрано Visual Studio Code, тому що він:

- безкоштовний для завантаження та використання, і має відкритий код. Це означає, що можна редагувати та змінювати код редактора, що дозволяє налаштувати його під свої потреби;
- інтегрований з Git та іншими інструментами, тобто Visual Studio Code має інтеграцію з Git, що дозволяє розробникам керувати версіями свого коду та співпрацювати з іншими розробниками;
- забезпечує функціональність та продуктивність, тобто Visual Studio Code має широкий набір функцій та інструментів, які допомагають розробникам писати код швидше та ефективніше. Наприклад, редактор має функцію автодоповнення, підказки, відладчик та багато іншого, що дозволяє писати якісний код за значно менший час.

Числові розв'язки крайової задачі (1)-(10) знайдено методом скінчених елементів (МСЕ). Основи його застосування до задач розглянутого типу описано в роботах [5, 14, 15]. Однак, розвиваються і альтернативні методи розв'язування подібних крайових задач [16, 17].

### IV. ВИСНОВКИ

У роботі було досліджено процеси нелінійної неізотермічної фільтрації рідини в пористому середовищі з умовами спряження на тонкому

включенні (геобар'єри). Модель базується на рівняннях консолідації та теплоперенесення, що дозволило детально описати зміни напорів, теплового режиму в ґрунтовому масиві під впливом зовнішніх факторів.

Числові розв'язки відповідної нелінійної крайової задачі реалізовані за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Це дозволило знайти розв'язки, які мають розрив на тонкому включенні. Програмна реалізація на мові Python з використанням бібліотек NumPy та SciPy дозволила ефективно виконувати чисельні розрахунки і візуалізувати результати змін основних фізичних параметрів у часі та просторі.

Результати моделювання показали, що наявність геобар'єра суттєво впливає на розподіл напорів та температури, створюючи різкі зміни цих параметрів на межі бар'єру. Це підтверджує важливість використання геобар'єрів у системах захисту підземних вод, зокрема на полігонах твердих побутових відходів. Однак, урахування неізотермічних умов зменшує вплив порогового градієнта напорів матеріалу геобар'єра. Як результат – процес фільтрації через бар'єр прискорюються і, відповідно, нівелюються його властивості як захисного елемента від поширення забруднень в ґрунти та ґрунтові води. Тому при проектуванні захисних споруд із тонкими включеннями в їх основах важливо враховувати можливу неізотермічність умов.

Надалі основним напрямком вдосконалення моделі буде дослідження впливу неізотермічних умов на властивості пористого середовища, а також використання більш складних граничних умов для урахування динамічних змін зовнішніх факторів. Програмну реалізацію також планується покращити шляхом оптимізації алгоритмів та розширення функціональності для моделювання більш складних геометричних областей.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Ulianchuk-Martyniuk O.V., Michuta O.R., “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*, 2020, pp. 1067–1082.
- [2] Martyniuk P.M., Ulianchuk-Martyniuk O.V., “Model of non-isothermal consolidation in the presence of geobarriers and the total approximation properties of its finite element solutions,” *Journal of Optimization, Differential Equations and Their Applications*, vol. 31, No. 1, 2023, pp. 74–94.
- [3] P. Martyniuk, O. Ulianchuk-Martyniuk, V. Herus, O. Pryshchepa, “Integral conjugation conditions for a discontinuous filtration flow via a geobarrier in the case of its biocolmatation,” *International Journal of Applied Mathematics*, vol. 37(1), 2024, pp. 21–28.
- [4] Martyniuk P. M., Michuta O. R., Ulianchuk-Martyniuk O. V., “Numerical modeling of surface subsidence due to compaction of soil with fine inclusions,” *Mathematical Modeling and Computing*, vol. 11(1), 2024, pp. 50–58.
- [5] 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*, vol. 30(1), 2022, pp. 71–87.
- [6] O. V. Ulianchuk-Martyniuk, O. R. Michuta, N. V. Ivanchuk, “Finite element analysis of the diffusion model of the bioclogging of the geobarrier,” *Eurasian Journal Of Mathematical and Computer Applications*, vol. 9(4), 2021, pp. 100 – 114.
- [7] Ulyanchuk-Martyniuk O., Michuta, O., Ivanchuk N., “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), 2020, pp. 18–26.
- [8] Ulianchuk-Martyniuk O., Michuta O., “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*, vol. 19(1), 2020, pp. 141–154.
- [9] Kumar G., Reddy K.R., McDougall J., “Numerical modeling of coupled biochemical and thermal behavior of municipal solid waste in landfills,” *Computers and Geotechnics*, vol. 128, 2020, 103836.
- [10] Shengwei Wang, Qiang Wang, Bangbang Lu, Wei Zhu, “Thermal effects of the hydraulic conductivity and threshold gradient of sand-clay liners in municipal solid waste landfills,” *Waste Management*, vol. 154, 2022, pp. 217–222.
- [11] Yuntian Teng, Yifeng Wang, Zihao Li, Rui Qiao, Cheng Chen, “Temperature effect on non-Darcian flow in low-permeability porous media,” *Journal of Hydrology*, vol. 616, 2023, 128780.
- [12] Lyashko S.I., Nomirovskii D.A., “The generalized solvability and optimization of parabolic systems in domains with thin low-permeable inclusions,” *Cybernetics and Systems Analysis*, vol.39, 2003, pp.737–745.
- [13] Zhu B., Ye Z., Wang L., Xu W., Kong D., Nagel T., Kolditz O., Chen Y., “Theoretical investigation into thermo-osmosis and thermofiltration effects on hydromechanical behavior of saturated soils,” *Journal of Engineering Mechanics*, 2021, 04021005.
- [14] 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*, 5(5-107), 2020, pp. 41–48.
- [15] Herus V.A., Ivanchuk N.V., Martyniuk P.M., “A system approach to mathematical and computer modeling of geomigration processes using freefem++ and parallelization of computations,” *Cybernetics and Systems Analysis*, vol.54(2) 2018, pp. 284–294.
- [16] Bomba A., Boichura M., Sydorhuk B., “Generalization of numerical quasiconformal mapping methods for geological problems,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(4 (107), 2020, pp. 45–54.
- [17] Bomba A. Ya., Kuzlo M. T., Michuta O. R., Boichura M. V., “On a method of image reconstruction of anisotropic media using applied quasipotential tomographic data,” *Mathematical Modeling and Computing*, vol. 6 (2), 2019, pp. 211–219.

# Існування періодичних режимів в моделі типу Скеллама

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.094>

Василь Маценко

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Чернівці, Україна

v.matsenko@chnu.edu.ua

**Анотація** – Розглядається одне узагальнення моделі Скеллама, в якій мають місце монотонна стабілізація чисельності, періодичні режими та хаотична поведінка. Проведено комп'ютерне дослідження розв'язків моделі.

**Ключові слова** – дискретні моделі, модель Скеллама, стаціонарні стани, періодичні розв'язки, стійкість, збір урожаю.

## I. ВСТУП

Для опису динаміки чисельності популяції з неперекривними поколіннями застосовуються дискретні моделі. В простішому випадку вони мають вигляд  $N_{t+1} = f(N_t) N_t$ , де  $N_t > 0$  – чисельність популяції в момент часу  $t$ ,  $f(N_t)$  – коефіцієнт природного відтворення.

Серед таких рівнянь найбільш відомими є дискретна логістична модель, модель Рікера та Скеллама.

Але, якщо для перших двох моделей характерним є існування періодичних розв'язків будь-якого періоду [1,2], то модель Скеллама допускає тільки режими з монотонною стабілізацією чисельності популяції до деякого рівноважного стану [3].

В даній роботі запропонована така модифікація моделі Скеллама, яка теж має циклічні і хаотичні режими. Розглядається також модель зі збором урожаю.

## II. ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ

Модель Скеллама має вигляд  $N_{t+1} = aN_t / (b + N_t)$  [4], де  $a$  – найбільше значення коефіцієнта розмноження, а  $b$  описує вплив саморегулюючих механізмів на популяційну динаміку.

В роботі [3] розглянуто деякі модифікації моделі Скеллама, які теж допускають тільки монотонну стабілізацію.

Виясняється, що модель вигляду

$$N_{t+1} = aN_t / (b + N_t^3), \quad a, b > 0, \quad (1)$$

володіє, крім стаціонарних станів, ще і періодичними і хаотичними режимами.

Рівняння (1) при  $a > b$ , крім нульового, має нетривіальний стаціонарний стан  $N_1^* = (a - b)^{1/3}$ .

При  $a < b$  нульовий розв'язок є стійким. При  $a > b$   $N_0^* = 0$  перестав бути стійким і з'являється розв'язок  $N_1^*$ , який буде стійким лише при умові  $a/3 < b < a$ .

Якщо  $a > 3b$ , то втрачається стійкість  $N_1^*$  (рис. 1) і з'являються періодичні розв'язки з періодом  $T = 2$ . Їх складають числа  $N_1^*, N_2^*$ , які знаходяться з рівняння

$$N_t = a^2 N_t (b + N_t^3)^2 / (b(b + N_t^3)^3 + (aN_t)^3). \quad (2)$$

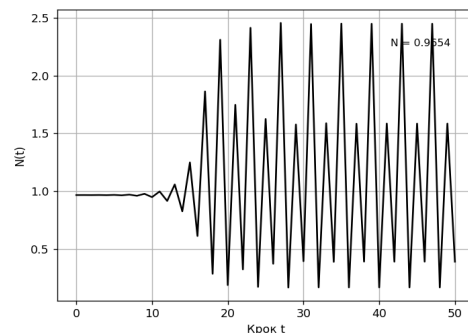


Рис. 1. Нестійкість стаціонарного розв'язку при  $a = 1, b = 0.1$

Встановлено, що при  $a > 3b$  рівняння (2) має два різні корені  $N_1^* > 0$  і  $N_2^* > 0$ . Знайшовши мультиплікатор періодичного розв'язку одержуємо, що періодичний розв'язок з періодом  $T = 2$  є стійким (рис. 2) при умові

$$(2^{1/2} - 1)a / 3 < b < a / 3.$$

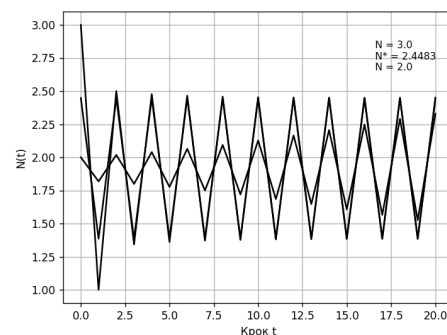


Рис. 2. Стійкість періодичного розв'язку ( $T = 2$ ) при  $a = 10, b = 3$

Це означає, що при  $b < (2^{1/2} - 1)a / 3$  періодичний розв'язок ( $T = 2$ ) перестав бути стійким, зате з'являється періодичний розв'язок з періодом  $T = 4$ .

Цей розв'язок знаходиться з умови  $N_{t+4} = N_t$  для  $t = 0, 1, 2, \dots$ , або те саме, що з рівняння  $x = \varphi(\varphi(\varphi(\varphi(x))))$ , де  $\varphi(x) = ax / (b + x^3)$ .

Такі рівняння уже можна розв'язувати лише числовими методами на комп'ютері.

Зокрема, при  $a = 2.67, b = 0.227$  одержали  $T$ -цикл ( $T = 4$ ), який задається числами  $N_1^* = 0.19087, N_2^* = 3.73198, N_3^* = 0.55059, N_4^* = 2.17832$ . Мультиплікатор цього розв'язку  $\mu = 0.039 < 1$ , що означає його стійкість (рис. 3).

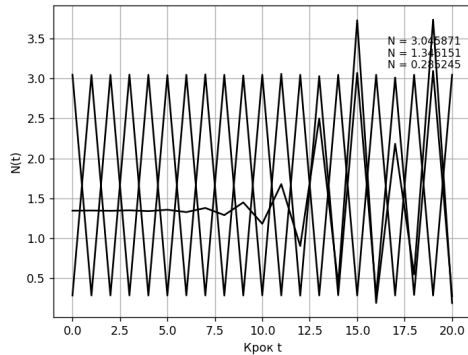


Рис. 3. Стійкість періодичного розв'язку ( $T = 4$ ) при  $a = 2.67, b = 0.227$

При цих значеннях  $a$  і  $b$  існуючі стаціонарні розв'язки і періодичні з періодом  $T = 2$  нестійкі.

При подальшій зміні параметрів  $a$  та  $b$  з'являлись періодичні розв'язки з періодом  $T = 8$ , тобто відбувається біфуркація подвоєння довжини циклу, а саме виникають цикли довжиною  $2^m$  ( $m > 2$ ), при цьому втрачається стійкість циклу довжиною  $2^{m-1}$ .

Зауважимо, що в результаті комп'ютерних експериментів для рівняння (1) не удалось знайти  $T$ -цикли для  $T = 3$ .

В даній роботі розглядалося ще узагальнення (1) на випадок м'якої стратегії збору врожаю, тобто

$$N_{t+1} = aN_t / (b + N_t^3) - kN_t, \quad a, b > 0, k \in (0, 1). \quad (3)$$

Для рівняння (3) знайдені ненульові стаціонарні стани і встановлено умови їх стійкості у вигляді

$$(1 + 2k) / (1 + k)^2 < 3b/a < (3 + 2k) / (1 + k)^2.$$

При умові  $b/a < (1 + 2k) / 3(1 + k)^2$  рівняння (3) має періодичні розв'язки ( $T = 2$ ). Зокрема, при  $a = 1, b = 0.1, k = 0.05$  одержали періодичний розв'язок  $N_1^* = 0.19945, N_2^* = 1.83793$ , який є нестійким (рис. 4).

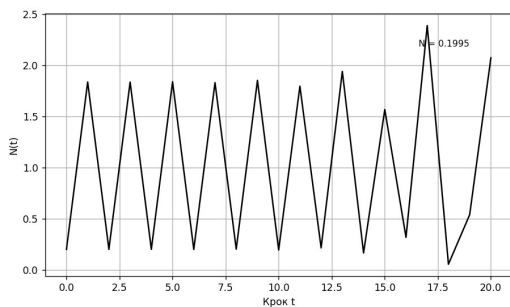


Рис. 4. Нестійкість періодичного розв'язку ( $T = 2$ ) моделі зі збором урожаю при  $a = 1, b = 0.1, k = 0.05$

Для знаходження періодичних розв'язків з періодом ( $T = 4$ ) розв'язувалося рівняння  $x = \psi(\psi(\psi(\psi(x))))$ , де  $\psi(x) = ax / (b + x^3) - kx$  (рис. 5).

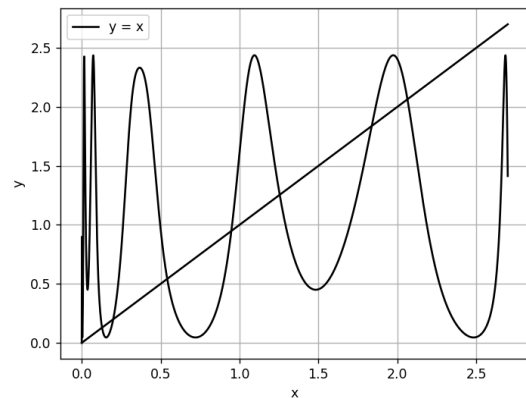


Рис. 5. Графічне розв'язування рівняння  $x = \psi(\psi(\psi(\psi(x))))$

Зауважимо, що для рівняння (3) були знайдені розв'язки, які мають хаотичну поведінку (рис. 6).

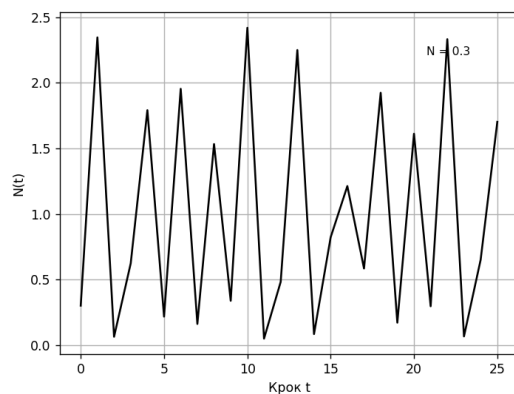


Рис. 6. Хаотичні режими при  $a = 1, b = 0.1, k = 0.05, N_0 = 0.3$

### III. ВИСНОВКИ

Як висновок зауважимо, що рівняння (1) та (3) мають монотонні, періодичні та хаотичні розв'язки. Відповідна зміна параметрів  $a, b$  приводить до біфуркації подвоєння довжини циклу.

Характерно те, що при експлуатації популяції може втрачатися стійкість розв'язків, яка мала місце в моделі без збору врожаю. Такі моделі дозволяють кількісно оцінити допустимий рівень антропогенного навантаження на біологічні популяції.

### Література

- [1] Маценко В.Г., “Математичне моделювання екологічних процесів : навч. посібник”, Чернівці, Чернівецький нац. у-нт ім. Ю. Федьковича, 2019, 376 с.
- [2] Маценко В.Г., “Моделювання процесів збору врожаю для популяцій з неперервними поколіннями”, Буковинський матем. журнал, 2022, 10(2), с. 165-175.
- [3] Маценко В.Г. “Аналіз моделей Скеллама із жорсткою стратегією збору врожаю”, Буковинський матем. журнал, 2024, 12(1), с. 74-83.
- [4] Skellam I.G., “Random dispersal in theoretical population”, Biometrika, 1951, 38, p. 196-218.

# Умови розв'язності для зв'язаної системи нелінійних операторних рівнянь Сільвестра у гільбертовому просторі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.095>

Олександр Покутний  
 Інститут математики НАН України  
 м. Київ, Україна  
[alex\\_poker@imath.kiev.ua](mailto:alex_poker@imath.kiev.ua)

Євген Панасенко  
 Запорізький національний університет  
 м. Запоріжжя, Україна  
[panasenko.yevgeniy@gmail.com](mailto:panasenko.yevgeniy@gmail.com)

**Анотація** – Розглянуто зв'язану систему нелінійних операторних рівнянь Сільвестра в гільбертовому просторі. Встановлено необхідну та достатню умови розв'язності для зв'язаної нелінійної операторної системи у критичному випадку.

**Ключові слова** – зв'язана система; гільбертовий простір; нелінійна система; операторне рівняння типу Ляпунова; псевдообернений за Муром-Пенроузом оператор.

## I. ВСТУП

Так як і рівняння Сільвестра зв'язані системи лінійних операторних рівнянь Сільвестра мають практичні застосування, зокрема, у задачах керування [1, 9].

Задача знаходження розв'язків нелінійних рівнянь, а особливо нелінійних систем, є однією з найважливіших задач математики. Як відомо [1], матричні рівняння Сільвестра виражають класичні методи дослідження неперервних та дискретних систем, які успішно застосовуються у задачах аналізу стійкості руху, а також мають застосування у задачах проектування [9] та задачах про топологічну ентропію нелінійних систем [6], та комутованих нелінійних систем [10], які досліджувалися Д. Ліберзоном та Г. Янгом. Системи нелінійних рівнянь не мають прямих методів розв'язання у загальному випадку. Тому, основною проблемою при розв'язанні нелінійних систем операторних рівнянь є визначення умов розв'язності та побудові збіжного ітераційного процесу знаходження розв'язку. Крім того, такі задачі знаходять застосування при моделюванні нейронних мереж Гопфільда [5].

## II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

### A. Постановка задачі

Розглянуто зв'язану систему нелінійних операторних рівнянь Сільвестра:

$$\begin{cases} A_{11}X_1(\varepsilon) + X_1(\varepsilon)B_{11} + \varepsilon R_1(X_2, X_3, \dots, X_n) = H_1, \\ A_{22}X_2(\varepsilon) + X_2(\varepsilon)B_{22} + \varepsilon R_2(X_1, X_3, \dots, X_n) = H_2, \\ \dots \dots \dots \\ A_{nn}X_n(\varepsilon) + X_n(\varepsilon)B_{nn} + \varepsilon R_n(X_1, X_2, \dots, X_{n-1}) = H_n. \end{cases} \quad (1)$$

У системі (1)  $A_{ii}, B_{ii}, H_i \in \mathcal{L}(\mathcal{H})$  — лінійні та обмежені оператори,  $\mathcal{H}$  — гільбертів простір.  $R_i(X_1(\varepsilon), X_2(\varepsilon), \dots, X_{i-1}(\varepsilon), X_{i+1}(\varepsilon), \dots, X_n(\varepsilon))$  — нелінійна за змінними  $X_i(\varepsilon)$ ,  $i = \overline{1, n}$  оператор-функція.

Задача полягає у тому, щоб знайти необхідні та достатні умови існування розв'язків операторної системи (1) за умови, що породжуюча система, коли  $\varepsilon = 0$ , має розв'язки і відповідні розв'язки  $X_i(\varepsilon)$ , при  $\varepsilon \rightarrow 0$  прямують до розв'язків  $X_i^0$  породжуючої задачі:

$$A_{ii}X_i^0 + X_i^0B_{ii} = H_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

### B. Лінійна задача

При  $\varepsilon = 0$  отримаємо породжуючу задачу (2), яку можна записати в операторній формі, у припущенні, що оператори  $L_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  є нормально-розв'язними ( $R(L_i) = \overline{R(L_i)}$ ) [4]:

$$\begin{cases} L_1X_1^0 = A_{11}X_1^0 + X_1^0B_{11} = H_1, \\ L_2X_2^0 = A_{22}X_2^0 + X_2^0B_{22} = H_2, \\ \dots \dots \dots \\ L_nX_n^0 = A_{nn}X_n^0 + X_n^0B_{nn} = H_n. \end{cases} \quad (3)$$

Необхідна та достатня умова розв'язності системи (3) є такою [4]:

$$P_{N(L_i^*)}H_i = 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Тут  $P_{N(L_n)} = I - L_n^+L_n$  й  $P_{N(L_n^*)} = I - L_nL_n^+$  є операторами проектування, які проектують гільбертовий простір  $\mathcal{H}$  на ядро  $N(L_n)$  та коядро  $N(L_n^*)$  оператора  $L_n$  відповідно;  $L_n^+$  є псевдообернений за Муром-Пенроузом оператор [4].

За виконання умови (4) розв'язок системи має такий вигляд:

$$\begin{cases} X_1^0 = L_1^+H_1 + P_{N(L_1)}C_1^0, \\ X_2^0 = L_2^+H_2 + P_{N(L_2)}C_2^0, \\ \dots \dots \dots \\ X_n^0 = L_n^+H_n + P_{N(L_n)}C_n^0, \end{cases} \quad (5)$$

де  $C_i^0$ ,  $i = \overline{1, n}$  — лінійні та обмежені оператори.



III. НЕЛІНІЙНА ЗАДАЧА

A. Необхідна умова

Знайдено необхідну умову існування розв'язку  $X_i(\varepsilon)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , які при  $\varepsilon = 0$  перетворюються у породжуючий розв'язок  $X_i^0(\varepsilon)$  вигляду (5).

Якщо зв'язана система лінійних операторних рівнянь Сільвестра (2) має розв'язок, то повинні виконуватися умови розв'язності:

$$\begin{cases} P_{N(L_1^*)}[H_1 - \varepsilon R_1(X_2(\varepsilon), X_3(\varepsilon), \dots, X_n(\varepsilon))] = 0, \\ P_{N(L_2^*)}[H_2 - \varepsilon R_2(X_1(\varepsilon), X_3(\varepsilon), \dots, X_n(\varepsilon))] = 0, \\ \dots \dots \dots \\ P_{N(L_n^*)}[H_n - \varepsilon R_n(X_1(\varepsilon), X_2(\varepsilon), \dots, X_{n-1}(\varepsilon))] = 0. \end{cases}$$

При  $\varepsilon \neq 0$ , враховуючи умови розв'язності (4) і неперервність по  $\varepsilon$  функцій  $X_i(\varepsilon)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , перейдемо до границі при  $\varepsilon \rightarrow 0$ ,  $X_i(\varepsilon) \rightarrow X_i^0(C_i^0)$ , отримаємо систему

$$\begin{cases} P_{N(L_1^*)}R_1(\dots, L_n^+H_n + P_{N(L_n)}C_n^0) = 0, \\ P_{N(L_2^*)}R_2(\dots, L_n^+H_n + P_{N(L_n)}C_n^0) = 0, \\ \dots \dots \dots \\ P_{N(L_n^*)}R_n(\dots, L_{n-1}^+H_{n-1} + P_{N(L_{n-1})}C_{n-1}^0) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Якщо система (6) має розв'язок, тоді елементи  $C_i^0$ ,  $i = \overline{1, n}$  обумовлюють ті породжуючі розв'язки  $X_i(\varepsilon) \in C[0; \varepsilon_0]$ ,  $X_i(0) = X_i^0(C_i^0)$  системи (1). Якщо система (6) немає дійсних розв'язків, то система (1) немає шуканого розв'язку.

Таким чином, доведено необхідну умову існування розв'язків зв'язаної системи нелінійних операторних рівнянь Сільвестра.

**Теорема** (необхідна умова). Нехай виконана умова розв'язності (4) породжуючої задачі (2) і задача (1) представляє собою критичний випадок:  $P_{N(L_i^*)} \neq 0$ ,  $i = \overline{1, n}$  і має розв'язок  $X_i(\varepsilon)$ , який перетворюється при  $\varepsilon = 0$  на один з розв'язків  $X_i^0$  лінійної породжуючої системи (3) з операторами  $C_i = C_i^0 \in \mathcal{H}$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Тоді, ці оператори задовольняють нелінійну операторну систему (6) для породжуючих операторів.

B. Достатня умова

Зробивши у системі (1) заміну змінних

$$X_i(\varepsilon) = X_i^0(C_i^0) + Y_i(\varepsilon) \quad (7)$$

можна визначити умови існування і побудувати розв'язок  $Y_i(\varepsilon) \in C[0; \varepsilon_0]$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Тоді

$$\begin{cases} A_{11}X_1^0(C_1^0) + X_1^0(C_1^0)B_{11} + A_{11}Y_1(\varepsilon) + Y_1(\varepsilon)B_{11} + \\ + \varepsilon R_1(X_2^0(C_2^0) + Y_2(\varepsilon), \dots, X_n^0(C_n^0) + Y_n(\varepsilon)) = H_1, \\ A_{22}X_2^0(C_2^0) + X_2^0(C_2^0)B_{22} + A_{22}Y_2(\varepsilon) + Y_2(\varepsilon)B_{22} + \\ + \varepsilon R_2(X_1^0(C_1^0) + Y_1(\varepsilon), \dots, X_n^0(C_n^0) + Y_n(\varepsilon)) = H_2, \quad (8) \\ \dots \dots \dots \\ A_{nn}X_n^0(C_n^0) + X_n^0(C_n^0)B_{nn} + A_{nn}Y_n(\varepsilon) + Y_n(\varepsilon)B_{nn} + \\ + \varepsilon R_n(X_n^0 + Y_n(\varepsilon), \dots, X_{n-1}^0(C_{n-1}^0) + Y_{n-1}(\varepsilon)) = H_n. \end{cases}$$

Виділивши в оператор-функція  $R_i(X_1(\varepsilon), X_2(\varepsilon), \dots, X_{i-1}(\varepsilon), X_{i+1}(\varepsilon), \dots, X_n(\varepsilon))$  ліній-

ну частину по  $Y_i$  і члени нульового порядку по  $\varepsilon$ , а також враховуючи, що  $X_i^0(C_i^0)$  є розв'язком системи (3) і елементи  $C_i^0$  задовольняють систему (6) та заміну змінних (7), отримаємо такі умови розв'язності:

$$P_{N(L_i^*)}[R_i(Y_1(\varepsilon), \dots, Y_{i-1}(\varepsilon), Y_{i+1}(\varepsilon), \dots, Y_n(\varepsilon)) + \\ + \sum_{j=1, j \neq i}^n R'_{ij}(X_1^0(C_1^0), \dots) \\ \dots, X_{i-1}^0(C_{i-1}^0), X_{i+1}^0(C_{i+1}^0), \dots, X_n^0(C_n^0)) Y_i(\varepsilon)] = 0.$$

Ввіши оператор

$$B_{0ij} = \\ = P_{N(L_i^*)}[R_i(Y_1(\varepsilon), \dots, Y_{i-1}(\varepsilon), Y_{i+1}(\varepsilon), \dots, Y_n(\varepsilon)) + \\ + \sum_{j=1, j \neq i}^n R'_{ij}(X_1^0(C_1^0), \dots) \\ \dots, X_{i-1}^0(C_{i-1}^0), X_{i+1}^0(C_{i+1}^0), \dots, X_n^0(C_n^0)) P_{N(L_j)}],$$

отримаємо операторне рівняння

$$B_0 C_j = F_0, \quad (9)$$

де операторна матриця  $B_0 = B_{0ij}$  має вигляд:

$$B_{0ij} = \begin{pmatrix} 0 & B_{12} & B_{13} & \dots & B_{1n} \\ B_{21} & 0 & B_{23} & \dots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & B_{n3} & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Надалі для простоти будемо розглядати випадок, коли оператор  $B_0$  є нормально-розв'язними ( $R(L_i) = \overline{R(L_i)}$ ) [4]. Тоді, достатньою умовою розв'язності рівняння (9) буде наступна умова:

$$P_{N(B_0^*)} \begin{bmatrix} P_{N(L_1^*)} \\ P_{N(L_2^*)} \\ \vdots \\ P_{N(L_n^*)} \end{bmatrix} = 0. \quad (11)$$

За умови (11) один з розв'язків операторного рівняння (9) буде мати вигляд:

$$C_j = B_0^+ F_0, \quad (12)$$

а вектор  $F_0$ :

$$F_0 = \begin{pmatrix} -P_{N(L_1^*)} \left[ R_1(Y_2(\varepsilon), \dots, Y_n(\varepsilon)) + \sum_{j=2}^n R'_{1j} \bar{Y}_1(\varepsilon) \right] \\ -P_{N(L_2^*)} \left[ R_2(Y_1(\varepsilon), \dots, Y_n(\varepsilon)) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n R'_{2j} \bar{Y}_2(\varepsilon) \right] \\ \vdots \\ -P_{N(L_n^*)} \left[ R_n(Y_1(\varepsilon), \dots, Y_{n-1}(\varepsilon)) + \sum_{j=1, j \neq n}^n R'_{nj} \bar{Y}_n(\varepsilon) \right] \end{pmatrix}.$$

Продовжуючи цей процес та використовуючи відомі методи [4], отримаємо достатню умову

розв'язності зв'язаної системи нелінійних операторних рівнянь Сільвестра (1).

**Теорема** (достатня умова). Нехай породжуюча система (3) при умові (4) має розв'язок вигляду (5) і система (3) представляє собою критичний випадок:  $P_{N(L_i^*)} \neq 0$ ,  $i = \overline{1, n}$ , і нехай оператор  $B_0$  задовольняє умови:

- 1)  $B_0$  — нормально-розв'язний оператор;
- 2) виконується умова (11).

Тоді, для будь-яких елементів  $C_i^0$ ,  $i = \overline{1, n}$ , які задовольняють нелінійну операторну систему для породжуючих операторів (6), система (8) має хоча б один розв'язок  $Y_i(\varepsilon)$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Цей розв'язок можна знайти за допомогою збіжного на  $[0; \varepsilon_0]$  ітераційного процесу:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_i^{k+1}(\varepsilon) = & -\varepsilon L_i^+ [\varphi_i(C_1^0, \dots, C_{i-1}^0, C_{i+1}^0, \dots, C_n^0) + \\ & + R_i(Y_1(\varepsilon), \dots, Y_{i-1}(\varepsilon), Y_{i+1}(\varepsilon), \dots, Y_n(\varepsilon)) + \\ & + \sum_{j=1, j \neq i}^n R'_{ij}(X_1^0(C_1^0), \dots) \\ & \dots, X_{i-1}^0(C_{i-1}^0), X_{i+1}^0(C_{i+1}^0), \dots, X_n^0(C_n^0)) Y_j^k(\varepsilon)]; \\ & \begin{pmatrix} C_1^0 \\ C_2^0 \\ \vdots \\ C_n^0 \end{pmatrix} = B_0^+ \times \\ & \times \begin{pmatrix} -P_{N(L_1^*)} \left[ R_1(Y_2(\varepsilon), \dots, Y_n(\varepsilon)) + \sum_{j=2}^n R'_{1j} \bar{Y}_1^k(\varepsilon) \right] \\ -P_{N(L_2^*)} \left[ R_2(Y_1(\varepsilon), \dots, Y_n(\varepsilon)) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n R'_{2j} \bar{Y}_2^k(\varepsilon) \right] \\ \vdots \\ -P_{N(L_n^*)} \left[ R_n(Y_1(\varepsilon), \dots, Y_{n-1}(\varepsilon)) + \sum_{j=1, j \neq n}^n R'_{nj} \bar{Y}_n^k(\varepsilon) \right] \end{pmatrix}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_i^{k+1} &= \bar{Y}_i^{k+1}(\varepsilon) + P_{N(L_i)} C_i^k, \\ C_i^k &\in \mathcal{H}, \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{0, \infty}. \end{aligned}$$

#### IV. ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано підхід для побудови розв'язку зв'язаної системи нелінійних операторних рівнянь Сільвестра в гільбертовому просторі у критичному випадку:  $P_{N(L_i^*)} \neq 0$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Доведено, що розв'язок можна знайти за допомогою збіжного на відрізьку  $[0; \varepsilon_0]$  ітераційного процесу.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] О. Г. Мазко, “Матричні методи аналізу та синтезу динамічних систем,” Київ: Наукова думка, 2023. 321 с.
- [2] О. Бойчук, Є. Панасенко and О. Покутний, “Крайові задачі для рівняння Ляпунова. I,” Український математичний журнал, 2024, Vol. 76, No. 3, сс. 353–372.
- [3] О. Бойчук, Є. Панасенко and О. Покутний, “Крайові задачі для рівняння Ляпунова. II,” Український математичний журнал, 2024, Vol. 76, No. 5, сс. 680–694.
- [4] О. Бойчук and О. Покутний, “Нормально-розв'язні крайові задачі для операторно-диференціальних рівнянь,” Київ: Наукова думка, 2022. 221 с.
- [5] O. Boichuk, D. Bihun, V. Feruk and O. Pokutnyi, “Minimizing of the quadratic functional on Hopfield networks,” Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations, 2021, No. 92, pp. 1–20.
- [6] D. Liberzon, “On Topological Entropy of Interconnected Nonlinear Systems,” IEEE Control Systems Letters, 2021, Vol. 5, No 6, pp. 2210–2214.
- [7] E. Panasencko and O. Pokutnyi, “Bifurcation Conditions for the Solutions of the Lyapunov Equation in a Hilbert Space,” Journal of Mathematical Sciences, 2019, Vol. 236, No. 3, pp. 313–332.
- [8] E. Panasencko and O. Pokutnyi, “Nonlinear Boundary-Value Problems for the Lyapunov Equation in the Space,” Journal of Mathematical Sciences, 2020, Vol. 246, No. 3, pp. 394–409.
- [9] A. Vandendorpe and P. Van Dooren, “Model Reduction of Interconnected Systems,” Research Aspects and Applications, 2008, Vol. 13, pp. 305–321.
- [10] G. Yang, D. Liberzon and J. Hespanha, “Topological entropy of switched nonlinear and interconnected systems,” arXiv.org (2301.12483 [eess.SY]), 2023, pp. 1–31.
- [11] .G Yang and D. Liberzon, “Lyapunov-based small-gain theorem for interconnected switched systems,” Systems And Control Letters, 2015, Vol. 78, pp. 47–54.

# Ряди Фур'є періодичних функцій зі змінним періодом

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.096>

Микола Приймак  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.  
м. Тернопіль, Україна.  
pmw.ukr@ukr.net

**Ключові слова** – періодичні функції із змінним періодом; змінний період; ортогональна система тригонометричних функцій із змінним періодом; ряди Фур'є періодичних функцій із змінним періодом.

## I. ВСТУП

Крім періодичних сигналів, період яких вважається постійним, в останні роки звернуто увагу на сигнали, які з однієї сторони ведуть себе подібно до періодичних, проте їх період вже не є постійним, а певним чином змінюється. Такими є електрокардіограми, отримані під час чи після дії на організм певного збудника спокою, звук сирени повітряної тривоги тощо. Для періодичних сигналів, моделлю яких є періодичні функції, методи їх дослідження розроблені достатньо різносторонньо [1]. Щодо сигналів із змінним періодом, то для їх вивчення найперше необхідно вибрати їх модель, яка б стала базою розробки методів аналізу вказаних сигналів. Таку модель вперше було запропоновано в [2], в якій був введений клас періодичних функцій із змінним періодом.

## 2. Ортогональна система тригонометричних функцій із змінним періодом.

Наявність функцій із змінним періодом ставить нові проблемні задачі. Найперше – це побудова рядів Фур'є таких функцій. Передумовою для цього є наявність відповідної ортогональної системи функцій із змінним періодом. Вперше така система була побудована в [3], більш різносторонньо система досліджувалася в [4]. Має місце наступна

Теорема. Система тригонометричних функцій

$$1, \sin kx^\alpha, \cos kx^\alpha, \alpha > 0, x \in I, k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

змінний період якої  $T(x) = -x + (x^\alpha + 2\pi)^{1/\alpha}$ , є ортогональною із ваговою функцією  $\rho(x) = (x^\alpha)'$  на довільному інтервалі

$$[x, x + T(x)] \quad (2)$$

при цьому скалярний добуток однакових функцій системи (1) рівний, різних – рівний нулю.

## 3. Ряди Фур'є періодичних функцій із змінним періодом.

Нехай  $f(x)$  – періодична функція із змінним періодом  $T(x) = -x + (x^\alpha + 2\pi)^{1/\alpha}$ , ваговою є функція  $\rho(x) = (x^\alpha)' = x^{\alpha-1}$ . Коефіцієнти Фур'є функції  $f(x)$  по ортонормованій системі (1) обчислюються за формулами

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{\alpha}{\pi} \int_{\tau}^{\tau+T(\tau)} x^{\alpha-1} f(x) dx, & a_k &= \frac{\alpha}{\pi} \int_{\tau}^{\tau+T(\tau)} x^{\alpha-1} f(x) \cos kx^\alpha dx, \\ b_k &= \frac{\alpha}{\pi} \int_{\tau}^{\tau+T(\tau)} x^{\alpha-1} f(x) \sin kx^\alpha dx. \end{aligned} \quad (3)$$

Відповідний ряд Фур'є має вигляд

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos kx^\alpha + b_k \sin kx^\alpha$$

Якщо

$$S_n(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos kx^\alpha + b_k \sin kx^\alpha$$

скінченна сума ряду Фур'є, то згідно [4] середнє квадратичне відхилення  $S_n$  від  $f$  визначається за формулою

$$\|f(x) - S_n(x)\|_{\rho}^2 = \int_{\tau}^{\tau+T(\tau)} (f(x) - S_n(x))^2 \rho(x) dx$$

Зауваження. Аналіз формул (1), (2) і (3) показує, що в залежності від параметра  $\alpha$  змінюється:

- ✓ ортогональна тригонометрична система функцій (1);
- ✓ інтервал ортогональності (2);
- ✓ вагова функція  $\rho(x)$ .

## 4. Приклади рядів Фур'є функцій із змінним періодом.

Для побудови скінчених рядів Фур'є функцій із змінним періодом було написано програмне

забезпечення. В розглянутих нижче прикладах для знаходження суми  $S_n$  параметру  $n$  надавалося значення 50.

Приклад 1. Розглянемо функцію  $f(x) = \text{sign}\left(\sin x^{2/3}\right)$ , для якої її змінний період  $T_{2/3}(x) = -x + \left(x^{2/3} + 2\pi\right)^{3/2}$ . Відповідно до виразу функції  $f(x)$  ортонормованою є система:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{\sin kx^{2/3}}{\sqrt{\pi}}, \frac{\cos kx^{2/3}}{\sqrt{\pi}}, k = 1, 2, \dots$$

Для знаходження коефіцієнтів (3) був вибраний інтервал ортогональності  $[\tau, \tau + T_{2/3}(\tau)]$  при  $\tau = 10$ . Оскільки

$$T_{2/3}(10) = -10 + \left(10^{2/3} + 2\pi\right)^{3/2} \approx 26.11,$$

то таким є інтервал  $[10, 10 + T_{2/3}(10)] = [10; 36.11]$ . Було знайдено

$n = 50$  коефіцієнтів  $a_k$  і  $b_k$  ряду Фур'є. Графік скінченної суми ряду на проміжку  $[0, 75]$  показаний на рисунку 1. Із поведінки графіка видно його «розтягування», що відповідає зростанню періода  $T_{2/3}(x)$ . Спостерігається також, що сума  $S_{50}$  досить «добре» відтворює саму функцію  $f(x) = \text{sign}\left(\sin x^{2/3}\right)$ , зображену пунктирною лінією.

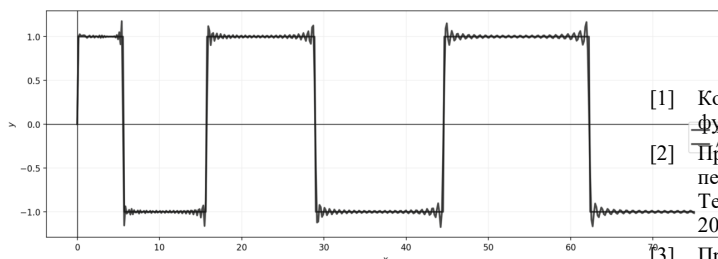


Рисунок 1. Графік скінченної суми ряду Фур'є функції  $\text{sign}\left(\sin x^{2/3}\right)$ ,

Розглянемо ще приклад побудови скінченного ряду Фур'є для функції «дробова частина» числа.

Приклад 2. Нехай  $f(x) = \left\{x^{3/5}\right\}$ . Змінний

$$T_{3/5}(x) = -x + \left(x^{3/5} + 1\right)^{5/3}$$

період цієї функції. Для знаходження коефіцієнтів ряду вибрано відповідну ортонормовану систему та інтервал інтегрування  $[\tau, \tau + T(\tau)]$  при  $\tau = 0$ . Оскільки

$$T(0) = -0 + \left(0^{3/5} + 1\right)^{5/3} = 1,$$

то таким є інтервалом  $[0, 0 + T(0)] = [0; 1]$ . Графік скінченної суми  $S_{50}$  розміщено на рисунку 2.

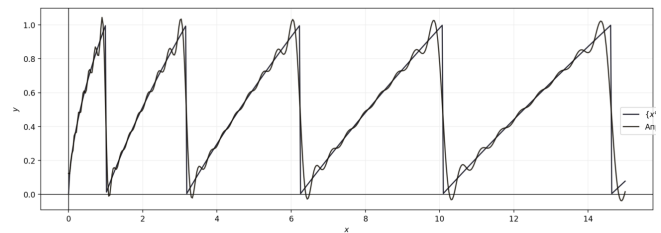


Рисунок 2. Графік скінченної суми ряду Фур'є для

$$\text{функції } f(x) = \left\{x^{3/5}\right\}.$$

### Висновки.

За основний напрям досліджень періодичних сигналів із змінним періодом вибрано побудову їх рядів Фур'є, що еквівалентно заміні сигналів їх аналітичними функціями, якими є ряди Фур'є, з подальшим дослідженням вже не самих сигналів, а їх рядів. Отримані результати відкривають перспективні напрямки дослідження реальних сигналів із змінним періодом, зокрема електрокардіограм, отриманих під час чи після дії на організм збудника спокою.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: «Наука», 1976. – 542 с.
- [2] Приймак М.В., Боднарчук І.О., Лупенко С.А. Умовно періодичні випадкові процеси із змінним періодом // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2005. – Т.10, №2. – С. 132-141.
- [3] Приймак М.В. Ортогональні системи періодичних функцій із змінним періодом // Матеріали одинадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. Тернопіль, вид. ТДТУ, 2007. – С..72.
- [4] Приймак М.В. Періодичні функції із змінним періодом та їх ряди Фур'є. Монографія. – Тернопіль: ТОВ Тернограф, 2024. – 136 с.

# Інформаційно-вимірвальна система оцінки змінного періоду

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.097>

Микола Приймак  
Тернопільський національний технічний  
університет імені Івана Пулюя.  
м. Тернопіль, Україна.  
pmw.ukr@ukr.net

Володимир Готович  
Тернопільський національний технічний  
університет імені Івана Пулюя.  
м. Тернопіль, Україна.  
gotovych@gmail.com

Василь Кохан  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя.  
м. Тернопіль, Україна.  
vsmentvs@gmail.com

**Ключові слова** – періодичні функції із змінним періодом; змінний період серцебиття; частота серцебиття; апроксимація змінного періоду, варіабельність серцевого ритму, оцінка аритмії.

## ВСТУП

1. Коли мова заходить про **періодичні функції** та їх **ряди Фур'є**, то, як правило, припускається, що період функцій є відомим. Для реальних періодичних сигналів їх період переважно невідомий. Така ж ситуація характерна і для **періодичних сигналів із змінним періодом (ЗП)**, наприклад, для електрокардіограм (**ЕКГ**), отриманих після дії на організм фізичного навантаження чи іншого збудника спокою. Щоб досліджувати такі ЕКГ, наприклад методами **рядів Фур'є**, необхідно знати їх ЗП  $T(x)$ . Оскільки в практичних дослідженнях змінний період ЕКГ (як загалом і для більшості сигналів із ЗП), є невідомим, виникає задача знаходження його **оцінки**. Крім побудови рядів Фур'є оцінка ЗП має також самостійне значення, в першу чергу при дослідженні варіабельності серцевого ритму. Деякі із питань оцінки ЗП розглядалися раніше [1,2]. Основною задачею цієї роботи є розробка **інформаційно-вимірвальної системи (ІВС)** побудови оцінки ЗП та її застосування кардіології для задач варіабельності серцевого ритму.

Побудову оцінки ЗП розглянемо на прикладі оцінки частоти серцебиття після дії на організм пацієнта фізичного навантаження. Метод оцінки умовно розділимо на **два етапи**. Спочатку проводяться **експерименти** та відбір необхідних даних, пізніше на їх основі знаходиться **оцінка** ЗП та змінної частоти (ЗЧ) у вигляді певних **апроксимаційних функцій**.

Розробка ефективних систем керування такими БПЛА є дуже важливою для забезпечення їх

надійної та безпечної експлуатації. Сучасні економічні умови вимагають від підприємств та організацій впровадження новітніх технологій, що сприяють оптимізації процесів та підвищенню конкурентоспроможності. У цьому контексті створення високоякісних систем керування БПЛА набуває особливої актуальності.

**Відбір експериментальних даних.** На першому етапі експерименту пацієнт піддається фізичному навантаженню (наприклад, двадцять глибоких присідань). Після цього здійснюється відбір моментів часу  $t_k, k = 1, 2, \dots, n + 1$ , в які з'являються пікові значення ( $R$ -зубці) ЕКГ. На основі послідовності  $t_k$  утворюємо послідовність

$$T_k = t_{k+1} - t_k, k = 1, 2, \dots, n.$$

Значення  $T_k$  – це по суті величини ЗП  $T(t)$  в моменти часу  $t_k$ . Обернені до періодів  $T_k$  величини є значеннями ЗЧ  $\nu_k = 1/T_k$ , які образно називають **частотою серцебиття**. Як приклад на рисунку 1 показано кожне **десяте** значення періодів  $T_k$  (графік 1) і частот  $\nu_k$  (графік 2)

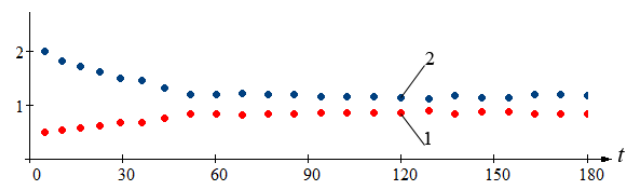


Рисунок 1. Кожне десяте значення ЗП  $T_k$ ,

(графік 1) та ЗЧ  $\nu_k$  (графік 2).



**Вибір функції апроксимації.** Для знаходження оцінки ЗП  $T(t)$  використаємо метод апроксимації експериментальних даних.

Аналізуючи показану на рисунку 1 поведінку значень  $T_k$  і  $v_k$ , видно, що підібрати апроксимуючу функцію для значень  $T_k$  є проблематично. В той же час поведінка  $v_k$  має вигляд експоненційної залежності, яку подамо у вигляді експоненційної функції

$$v(t) = a + be^{-\alpha t}, t \geq 0. \quad (1)$$

Оскільки період і частота обернено пропорційно пов'язані, апроксимуючою функцією для послідовності  $T_k$  є функція

$$T(t) = \frac{1}{v(t)} = \frac{1}{a + be^{-\alpha t}}. \quad (2)$$

**2. Міра відхилення функції апроксимації від експериментальних даних.** Степінь наближення функції апроксимації  $v(t)$  до експериментальних даних  $v_k$  визначається квадратичним відхиленням

$$S_v^2 = \sum_{k=1}^n (v_k - (a + be^{-\alpha t_k}))^2.$$

По аналогії з поняттям дисперсії величину  $\sigma_v^2 = S_v^2/n$  назвемо «дисперсійним» відхиленням, а значення

$$\sigma_v = \sqrt{S_v^2/n}, \quad (3)$$

– середньоквадратичним відхиленням

Мірою квадратичного відхилення функції апроксимації  $T(t)$  від значень  $T_k, k = 1, 2, \dots, n$ , є величина  $S_T^2 = \sum_{k=1}^n \left( T_k - \frac{1}{a + be^{-\alpha t_k}} \right)^2$ . та відповідне їй середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_T = \sqrt{S_T^2/n}. \quad (4)$$

**Оцінка змінної частоти та змінного періоду.** За тематикою цієї роботи проведено ряд експериментальних досліджень. Наведемо результати лише двох експериментів. В

**експерименті 1** відбір моментів часу  $t_k$  здійснювався примітивним методом, без використання будь яких технічних приладів. В **експерименті 2** відбір даних здійснювався **реєстратором ЕКГ**, виготовленим АТЗП (акціонерне товариство закритого типу) «Сольвейг», модель 06000.1. Для відібраних даних була проведена їх апроксимація і обчислені значення параметрів  $a, b$  і  $\alpha$  та значення середньоквадратичних відхилень  $\sigma_v$  і  $\sigma_T$ .

**Приклад.** В таблиці 1 наведені значення параметрів  $a, b$  і  $\alpha$  та значення  $\sigma_v$  і  $\sigma_T$ , обчислені згідно (3) і (4). Верхня стрічка – це результати експерименту 1. Друга стрічка (експеримент 2а) – результати другого експерименту, коли для оцінки параметрів  $a, b$  і  $\alpha$  використовувалися всі значення послідовності  $v_k, k = 1, 2, \dots, n$ . Третя стрічка (експеримент 2б) – результати цього ж експерименту 2, але для оцінки параметрів використовувалося кожне десяте значення  $v_k$ .

Таблиця 1. Значення параметрів оцінки змінної частоти.

	$a$	$b$	$\alpha$	$\sigma_v$	$\sigma_T$
Експеримент 1	1,148	1,015	0,013	0,041	0,016
Експеримент 2а	1,252	0,897	0,041	0,247	0,184
Експеримент 2б	1,205	0,521	0,031	0,272	0,165

За обчисленими значеннями параметрів  $a, b, \alpha$  записані **аналітичні оцінки** (апроксимаційні функції) ЗЧ  $v(t)$  та ЗП  $T(t)$ . Для **експерименту 1** зміна частота

$$v(t) = 1.148 + 1.015 \times e^{-0.013 t},$$

змінний період

$$T(t) = \frac{1}{1.148 + 1.015 \times e^{-0.013 t}}.$$

Результати експерименту 1 наведені на рисунку 2. Експериментальні дані ЗЧ  $v_k, k = 10, 20, \dots, 10n$  – точковий графік 1б; оцінка ЗП  $v(t)$  – графік 1а; експериментальні дані ЗП  $T_k$  – точковий графік 2б; оцінка ЗП  $T(t)$  – графік 2а.

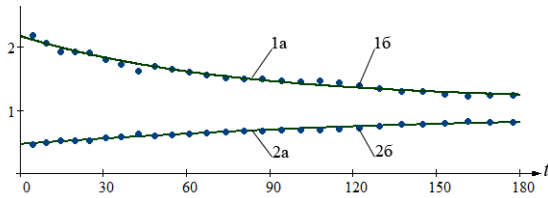


Рисунок 2. Результати експерименту 1: значення ЗЧ  $V_k$  – точковий графік 1a; оцінка ЗЧ  $v(t)$  – графік 1b; значення ЗП  $T_k$  – точковий графік 2a; оцінка ЗП  $T(t)$  – графік 2b.

Експериментальні дані та оцінка ЗЧ та ЗП для експерименту 2a показані на рисунку 3, дані для експерименту 2b наведені на рисунку 4.

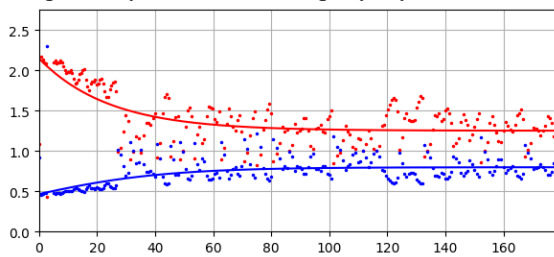


Рисунок 3. Результати експерименту 2a.

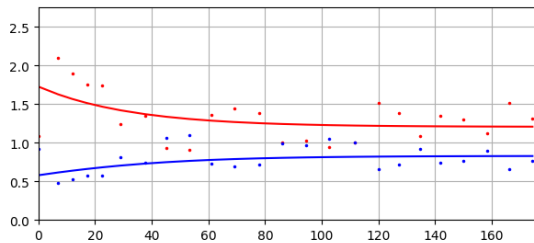


Рисунок 4. Результати експерименту 2b:

**Тлумачення параметрів  $a, b, \alpha$ .** При побудові оцінок змінної частоти і змінного періоду ми розглядали випадок, коли оцінка змінної частоти має вигляд експоненційної залежності, для опису якої були обчислені параметри  $a, b$  та  $\alpha$ . З позицій кардіології ці параметри мають чітку інтерпретацію при розгляді питання варіабельності (змінності) серцевого ритму при дії на організм збудника спокою.

✓ **Параметр  $a$**  означає **частоту** серцевого ритму (частоту пульсу) в стані **спокою**.

✓ **Параметр  $b$**  – величина, на яку **зростає частота** пульсу після дії на організм збудника спокою.

✓ **Сума  $a + b$**  – частота пульсу в перші моменти після дії збудника.

✓ **Параметр  $\alpha$**  характеризує «швидкість» стабілізації. При великих значеннях  $\alpha$  швидкість стабілізації прискорюється, тобто час стабілізації зменшується, при малих  $\alpha$  – навпаки.

**Зауваження.** На основі параметрів  $a, b, \alpha$  може бути обчислений час стабілізації серцебиття. Для цього необхідно попередньо провести консультації з кардіологами та побудувати відповідний алгоритм вказаного обчислення.

#### ВИСНОВКИ

У представлений роботі проведено аналіз Звернуто увагу, що крім періодичних сигналів, період яких є постійним, а моделлю є періодичні функції, в прикладних дослідженнях спостерігаються сигнали, для яких теж характерна періодичність, проте період певним чином змінюється. Але якщо для періодичних функцій методи їх аналізу і в першу чергу теорія їх рядів Фур'є розвинута достатньо глибоко, то сигнали із змінним періодом практично не вивчалися. Лише в останні роки запропонована модель таких сигналів у вигляді періодичних функцій із змінним періодом. Як основний напрям досліджень періодичних функцій із змінним періодом вибрано побудову їх рядів Фур'є. При обчисленні коефіцієнтів ряду, використовується змінний період. Та оскільки для реальних сигналів їх змінний період є невідомим, постає задача його оцінки. В цій роботі побудована оцінка змінної частоти та змінного періоду. Розглянуто приклади отримання вказаних оцінок. Отримані результати відкривають перспективні напрямки дослідження реальних сигналів із змінним періодом, зокрема електрокардіограм, отриманих під час чи після дії на організм збудника спокою.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Приймак М.В., Сарабун Р.О., Дмитроца Л.П. Оцінка змінного періоду та змінної частоти // Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький технологічний ун-т Поділля. – 2011. – №2. – С. 76-82.
- [2] Приймак М.В. Періодичні функції із змінним періодом та їх ряди Фур'є. Монографія. – Тернопіль: ТОВ Тернограф, 2024. – 136 с.

# Ідентифікація домішкових компонент у процесі магнітного фільтрування рідких середовищ

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.098>

Андрій Сафоник  
Національний університет водного  
господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[a.p.safonyk@nuwm.edu.ua](mailto:a.p.safonyk@nuwm.edu.ua)

Сергій Полухович  
Національний університет водного господарства  
та природокористування  
м. Рівне, Україна  
[s.o.polyukhovych@nuwm.edu.ua](mailto:s.o.polyukhovych@nuwm.edu.ua)

Володимир Грицюк  
Надслучанський інститут  
Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Березне, Україна  
[v.v.hrytsiuk@nuwm.edu.ua](mailto:v.v.hrytsiuk@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – модель процесу магнітного осадження домішок у пористих фільтрувальних насадках, яка враховує зворотний вплив характеристик процесу (концентрації осаду) на параметри фільтрації. Розроблено алгоритм розв'язку нелінійної оберненої задачі для визначення масообмінного коефіцієнта, що дозволяє суттєво наблизити числові результати до експериментальних даних. Модель дає змогу точніше прогнозувати ефективність очищення рідких середовищ у водно-дисперсних системах.

**Ключові слова** – модель магнітного осадження, обернена задача, ідентифікація, умова перевизначення, асимптотичний розв'язок, збурення.

## I. ВСТУП

У сучасних умовах якісне очищення рідких середовищ від домішок є вкрай важливим для різних галузей, таких як водоочистення, хімічна і фармацевтична промисловість, а також екологічний захист. Це завдання є особливо актуальним для промислових процесів, де навіть незначні домішки можуть негативно впливати на кінцевий продукт або процес, наприклад, у виробництві фармацевтичних препаратів або очищенні стічних вод.

Серед багатьох технологій для очищення рідин, магнітне фільтрування виявляється ефективним завдяки здатності видаляти дрібні частинки домішок за допомогою намагнічених фільтрувальних насадок. Ці фільтрувальні насадки мають особливу структуру пор, через які проходить рідина. Під дією магнітного поля, дрібні частинки, наявні в рідині, осаджуються на стінках цих пор або залишаються всередині них. Такий підхід дозволяє значно покращити очищення, оскільки більшість частинок, що могли б пройти через традиційні фільтри, утримуються магнітним полем.

Однак, існуючі математичні моделі, які описують процеси магнітного осадження домішок,

мають обмеження. Більшість аналітичних моделей (як зазначено у джерелах [1-4]) не враховують повністю зворотного впливу характеристик самого процесу на систему. Наприклад, у процесі фільтрації змінюється пористість середовища, а накопичення осаду впливає на швидкість фільтрації. Крім того, концентрація домішок, які осаджуються, змінює характеристики процесу, що ускладнює точність прогнозування. Відсутність цих корекцій в моделях призводить до значної похибки у розрахунках ефективності фільтрації.

Особливу увагу також варто приділити масообмінним коефіцієнтам, які визначають інтенсивність переносу частинок домішок у пористому середовищі фільтру. Експериментальні дані, наведені у деяких роботах ([3, 4]), дають загальне уявлення про цей процес, але не розкривають всіх деталей. Наявність цих прогалин вимагає створення нових підходів для математичного моделювання процесів осадження домішок.

Запропонована нелінійна модель магнітного осадження домішок у фільтрувальних насадках враховує зворотний вплив характеристик процесу (таких як зміна пористості середовища або концентрація осаду) на його параметри. Такий підхід дозволяє наблизити модель до реальних умов фільтрації. Окрім цього, важливим аспектом є точне визначення масообмінних коефіцієнтів за допомогою вирішення нелінійних обернених задач. Це забезпечує не тільки підвищення точності розрахунків, але й покращує прогнозування ефективності процесу очищення, що є надзвичайно важливим у промислових системах водопідготовки та очищення рідин.

Таким чином, розробка такої моделі дозволяє значно підвищити ефективність технологічних систем очищення рідких середовищ, що є ключовим для багатьох галузей промисловості. Це відкриває

нові можливості для оптимізації процесів фільтрації і забезпечення високої якості очищення.

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо просторово-одномірний процес очищення рідини шляхом фільтрації у фільтрі-шарі товщиною  $L$ , який ототожнюється з відрізком  $[0, L]$  осі  $x$ . Припустимо [3], що частинки забруднення можуть переходити з одного стану в інший (процеси захоплення-відриву, сорбції-десорбції), при цьому відбувається вплив відповідних концентрацій на характеристики шару, що розглядається. Відповідний процес фільтрації, з урахуванням зворотного впливу характеристик процесу (концентрації забруднення рідини та осаду) на параметри середовища (коефіцієнти пористості, фільтрації, масообміну тощо за аналогією з [3, 4]), опишемо наступною модельною задачею:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sigma(\rho)c(x,t))}{\partial t} + \frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t} + v\frac{\partial c(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t} = \beta c(x,t) - \varepsilon\alpha(t)\rho(x,t), \end{cases} \quad (1)$$

$$c|_{x=0} = c^*(t), \quad c|_{x=L} = 0, \quad \rho|_{t=0} = 0, \quad (2)$$

$$\alpha(t) \int_0^L \rho(\tilde{x}, t) d\tilde{x} = \mu(t), \quad (3)$$

де  $c(x, t)$  – концентрація домішок в рідкому середовищі в точці  $x$  та момент часу  $t$ ,  $\rho(x, t)$  – концентрація домішок, які осіли у фільтрі-насадці,  $\beta$  – коефіцієнт, що характеризує масові обсяги осадження домішок за одиницю часу,  $\alpha(t)$  – шуканий коефіцієнт, який характеризує масові об'єми відірваних від гранул засипки частинок,  $\mu(t)$  – функція, що характеризує масовий розподіл осаду з часом (знаходиться дослідним шляхом

умова перевизначення (3) – призначена для знаходження  $\alpha(t)$ ),  $v = \kappa(\rho) \cdot \text{grad } p$  – швидкість фільтрування,  $c^*(t)$  – концентрації домішок на вході фільтра,  $\sigma(x, t)$  – пористість насадки ( $\sigma_0$  – вихідна пористість насадки  $\sigma(\rho) = \sigma_0 - \varepsilon\sigma_s\rho(x, t)$ ),  $\kappa(\rho)$  – коефіцієнт фільтрування  $\kappa(\rho) = \kappa_0 - \varepsilon\gamma\rho(x, t)$  [3],  $\sigma_s, \kappa_0, \gamma, \varepsilon$  – жорсткі параметри (вони характеризують відповідні коефіцієнти  $\sigma(\rho), \kappa(\rho)$  – м'які параметри, знаходять експериментальним шляхом),  $\varepsilon$  – малий параметр, що характеризує відповідні збурення,  $p$  – тиск.

### III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Згідно з [4], коефіцієнт захоплення частинок домішки обчислюється за формулою  $\beta = \frac{\beta_0 H^{0.75}}{vd^2}$ , де  $\beta_0$  – вільний параметр,  $v$  – швидкість фільтрування,  $d$  – діаметр гранульованої насадки фільтра.

Наведемо результати розрахунків за  $c^*(t) = 1.7$  мг/л,  $\beta = 64 \text{ c}^{-1}$ ,  $v = 180 \text{ м/год}$ ,  $L = 1 \text{ м}$ . У результаті інтерполювання експериментальних даних [4] нами отримано масовий розподіл осаду з часом (рис. 1а). Тимчасову залежність відповідного масообмінного коефіцієнта  $\alpha(t)$  зображено на рисунку 1б. Зростання масообмінного коефіцієнта з часом пояснюється тим, що (для даного випадку за отриманого експериментально значення  $\mu(t)$ ) у процесі осадження частинок гранули пористої засипки максимально насичуються домішковими частками і під дією гідравлічного напору вірогідність відриву частинок від гранул зростає до часу  $\tau_s$  ефективної роботи фільтра.

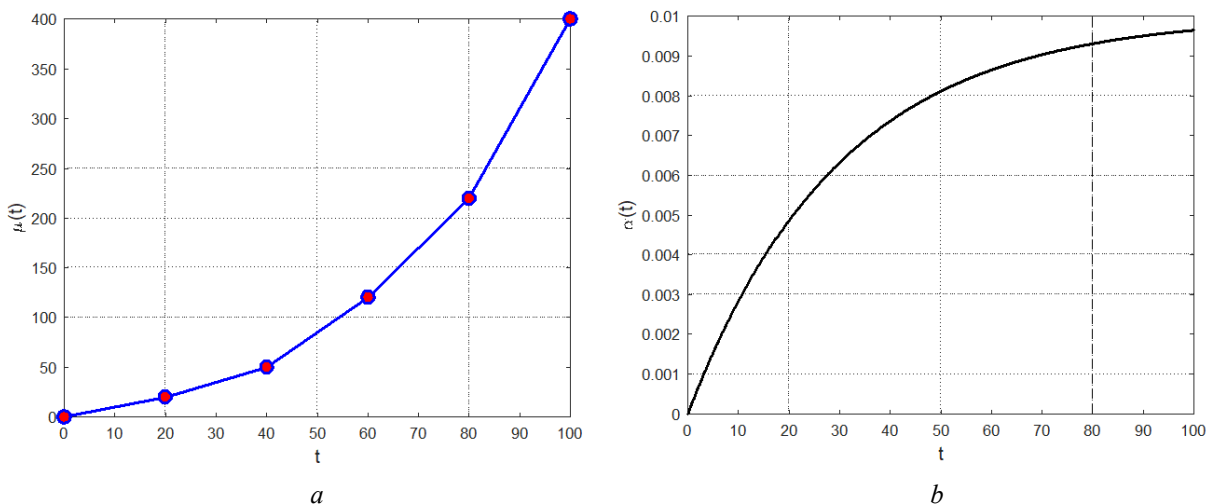


Рис.1. Масовий розподіл осаду  $\mu(t)$  – (а) і відповідного масообмінного коефіцієнта  $\alpha(t)$  – (б) з часом

На рисунку 2 показано розподіл концентрації домішок у рідині та осаді в різні моменти часу, що дозволяє оцінити процеси фільтрації та накопичення осаду у фільтрі. Припускаючи, що на виході фільтра (при  $L=1$ ) концентрація не перевищує допустимі  $c=c_{кр}=0.6$  мг/л, можемо визначити тривалість ефективної роботи фільтра, яка становить приблизно  $t=\tau_3=70$  годин. Цей показник відрізняється на 4 години від результатів, отриманих експериментальним шляхом, згаданих у джерелі [4]. Це може свідчити про різницю між теоретичними розрахунками та практичними умовами експерименту.

Протягом цього часу фільтр накопичить близько 230 г осаду, що підтверджує ефективність його роботи. Однак важливо враховувати зміну

характеристик фільтрації протягом часу. Зокрема, коефіцієнти пористості та фільтрації поступово зменшуються зі зростанням часу. Це пов'язано з фізичними процесами прилипання твердих частинок до стінок пір у фільтрі, що ускладнює подальше фільтрування і знижує ефективність системи. Тому зменшення цих коефіцієнтів варто враховувати при прогнозуванні тривалості роботи фільтра та його експлуатаційних властивостей.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію конструкції фільтра та дослідження інших параметрів, що впливають на зменшення пористості та швидкість фільтрації, щоб збільшити загальний час захисної дії фільтра.

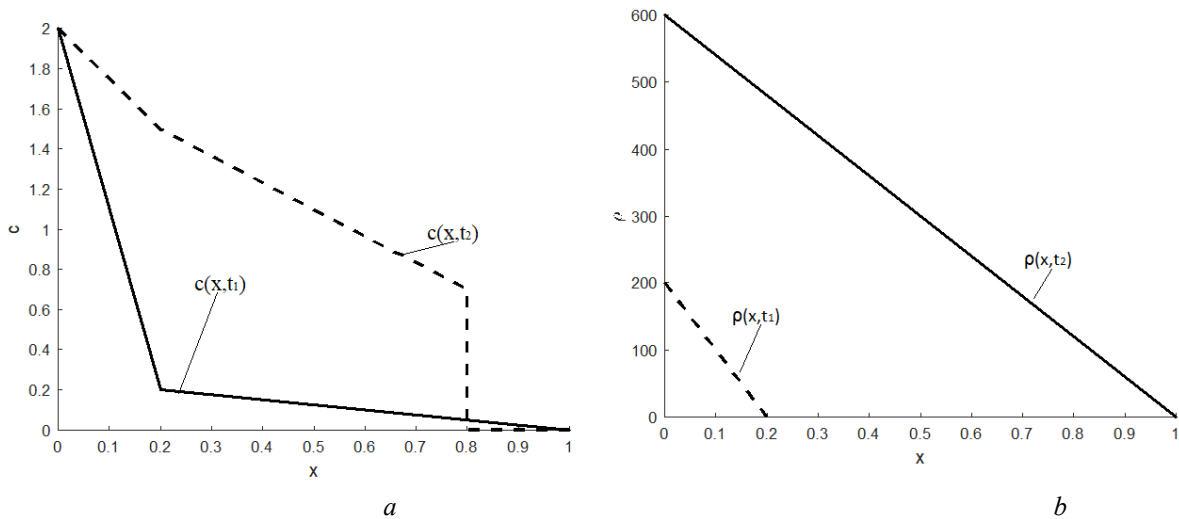


Рис. 2 – Розподіл  $c(x,t)$  – (a) і  $\rho(x,t)$  – (b) в момент часу  $t_1 = 25$  ч,  $t_2 = 75$  ч

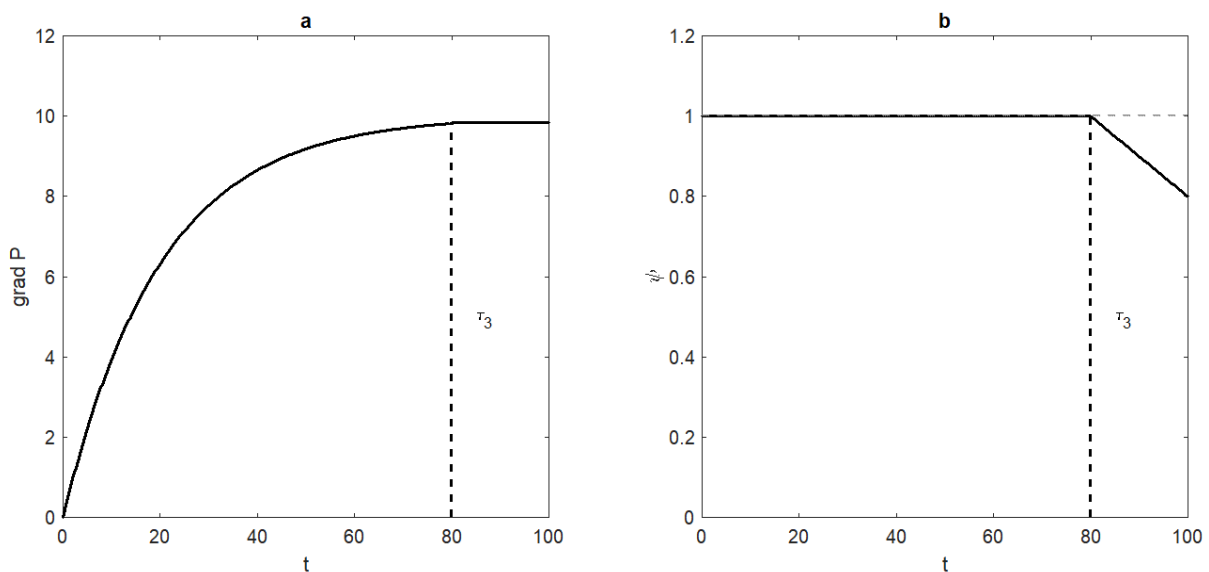


Рис.3 - Залежність  $grad p$  на виході фільтру – (a) ефективність фільтру  $(\psi(t) = (c_s^*(t) - c(L,t)) / c_s^*(t))$  – (b) від часу

У припущенні заданої швидкості потоку  $v = const$ , за формулою для градієнта тиску  $grad\ p = \frac{v}{\kappa(\rho)}$ , можна розрахувати відповідну

величину цього градієнта. Це дозволяє приймати рішення щодо зміни потужності двигуна насоса, який подає рідину до фільтра, для підтримання оптимального рівня фільтрації. Зокрема, контроль за градієнтом тиску є важливим аспектом автоматизації процесу фільтрації, оскільки дозволяє оперативно реагувати на зміну параметрів системи та забезпечувати постійну ефективність очищення.

Також можна визначити час досягнення критичного значення градієнта тиску. Це часовий момент, після якого фільтр починає втрачати свою ефективність через накопичення осаду, що перешкоджає проходженню рідини. Автоматизована система, орієнтуючись на це значення, може своєчасно коригувати параметри роботи фільтра або вимагати його очищення або заміни. Такий підхід значно підвищує надійність і тривалість роботи фільтраційної установки.

На рисунку 3а показано зміну градієнта тиску  $grad\ p$  з часом. Як видно з графіка на рисунку 3б, при певному значенні швидкості  $c_*(t) = c_* = const$  величина  $\psi$  градієнта тиску практично не змінюється до моменту часу  $\tau_*$ , а це свідчить про стабільну роботу фільтра в початковий період, що підтверджує відомий факт, що ефективність фільтра залишається на високому рівні на ранніх етапах його експлуатації. Після деякого проміжку спостерігається значне збільшення градієнта тиску, що сигналізує про зниження пористості фільтра і збільшення опору потоку рідини [5].

#### IV. ВИСНОВКИ

У представлений роботі створено математичну модель, яка детально описує процес магнітного осадження і накопичення домішок у пористій фільтрувальній насадці. Ця модель враховує важливі аспекти, зокрема зворотний вплив характеристик процесу, таких як концентрація осаду, на параметри середовища. Зміни в концентрації домішок безпосередньо впливають на пористість фільтру, його фільтраційні властивості, а також на інтенсивність масообміну, що має вирішальне значення для точного прогнозування ефективності фільтрації.

Модель також пропонує метод визначення невідомого масообмінного коефіцієнта, який характеризує інтенсивність переносу частинок домішок у фільтраційній системі. Знання цього коефіцієнта дозволяє суттєво покращити точність моделювання та наблизити числові результати до реальних експериментальних даних. Важливою складовою є розроблений алгоритм розв'язку

відповідної збуреної задачі, що дозволяє не тільки отримати точні результати, але й визначити час захисної дії фільтра, тобто час, протягом якого фільтр зберігає свою ефективність у процесі очищення.

Отримані в результаті моделювання дані дозволяють будувати розподіли питомої концентрації домішок та масового об'єму забруднень уздовж фільтрувальної пористої насадки для різних моментів часу. Це надає можливість детального аналізу процесу накопичення осаду і його впливу на роботу фільтра з плином часу. Такий підхід допомагає визначити критичні моменти, коли ефективність фільтра починає знижуватися через накопичення забруднень.

Окрім того, модель передбачає можливість автоматизованого контролю процесу осадження домішок у намагніченій фільтрувальній насадці на основі вхідних даних про забруднену водну систему. Така автоматизація дозволяє в режимі реального часу оцінювати ефективність процесу і приймати відповідні рішення щодо корекції роботи системи. Наприклад, на основі аналізу даних можна змінювати потужність насоса для подачі рідини у фільтр, що оптимізує процес фільтрації залежно від поточного рівня забруднення рідини і стану фільтраційного середовища.

Перспективним напрямом розвитку цієї моделі є моделювання процесів фільтрації в умовах неповних даних з урахуванням дифузії. Такий підхід дозволить ще точніше враховувати процеси переносу домішок у фільтрувальному середовищі, особливо коли недостатньо даних для повного опису системи. Врахування дифузії, яка відіграє ключову роль у випадках дрібнодисперсних домішок, допоможе більш точно описати процеси фільтрації у реальних умовах.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Petosa A.R., Jaisi, D.P., Quevedo, I.R., Elimelech, M., and Tufenkji, N. "Aggregation and Deposition of Engineered Nanomaterials in Aquatic Environments: Role of Physicochemical Interactions", *Environmental Science & Technology*, Volume 44, September 2020, pages 6532-6549.
- [2] Zubarev, Nikolay & Zubарева, O & Kochurin, Evgeny & Krakov, M.. (2019). Численное и аналитическое исследование неустойчивостей поверхности раздела жидкостей в электрическом и магнитном полях. 10.13140/RG.2.2.27128.80648.
- [3] Бомба А. Я. Нелінійні сингулярно-збурені задачі типу "конвекція – дифузія" / Бомба А. Я., Барановський С. В., Присяжнюк І. М. – Рівне : НУВГП, 2008. – 252 с.
- [4] Бомба А.Я. Нелінійні задачі типу фільтрація-конвекція-дифузія-масообмін за умов неповних даних / Бомба А. Я., Гаврилук В.І., Сафоник А.П., Фурсачик О.А. // Монографія. – Рівне : НУВГП, 2011. – 276 с.
- [5] Сергиенко І.В., Дейнека В.С. Идентификация градиентными методами параметров задач диффузии вещества в нанопористой среде // Проблемы управления и информатики. – 2010. – №6. С. – 5-18.
- [6] Осипов, Г.С & Вашакидзе, Н.С & Филиппова, Г.В & Рауш, Н.Л. (2023). Теория обратных задач на нечетких соответствиях. 10.17513/np.545.



# Ідентифікації масообмінного коефіцієнта у процесах очищення рідких середовищ від багатокomпонентного забруднення

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.099>

Андрій Сафоник  
 Національний університет водного господарства та природокористування.  
 м. Рівне, Україна  
[a.p.safonyk@nuwm.edu.ua](mailto:a.p.safonyk@nuwm.edu.ua)

Олег Рогов  
 Національний університет водного господарства та природокористування.  
 м. Рівне, Україна  
[rogovoleg4@gmail.com](mailto:rogovoleg4@gmail.com)

Олена Полухович  
 Національний університет водного господарства та природокористування  
 м. Рівне, Україна  
[o.o.poliukhovych@nuwm.edu.ua](mailto:o.o.poliukhovych@nuwm.edu.ua)

Наталія Ковальчук  
 Національний університет водного господарства та природокористування  
 м. Рівне, Україна  
[n.s.kovalchuk@nuwm.edu.ua](mailto:n.s.kovalchuk@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – У роботі запропоновано просторове узагальнення математичної моделі процесу очищення рідини від багатокomпонентних забруднень, де основна увага приділяється домінуванню конвективних складових над дифузійними. Модель враховує зворотний вплив ключових факторів, таких як концентрація забруднень у ріднині та осаді, на характеристики середовища, зокрема пористість і коефіцієнт дифузії. Додатково введено спеціальну умову перевизначення для визначення невідомого малого масообмінного коефіцієнта. Розроблено алгоритм розв'язку нелінійної оберненої задачі типу "конвекція-дифузія-масообмін", на основі якого проведено комп'ютерне моделювання.

**Ключові слова** – фільтрування, багатокomпонентна концентрація, конвекція, дифузія, масообмін, асимптотика, просторова нелінійна сингулярно збурена задача

## I. ВСТУП

Аналіз дослідження [1] показує складну взаємозалежність різних факторів, що впливають на процеси фільтрації через пористі середовища, які не враховувалися в класичних моделях таких систем. У роботі [2] було доведено, що форма фільтра відіграє важливу роль у процесі фільтрування, оскільки вона може як збільшувати, так і зменшувати параметри фільтрації, впливаючи на загальну продуктивність. Однак на сьогодні відсутні моделі, які враховують зворотний вплив характеристик процесу на середовище та дозволяють ідентифікувати невідомі параметри в процесах очищення рідин від багатокomпонентного забруднення. У роботі [3] запропоновано математичну модель очищення рідини через пористу насадку, яка враховує зворотний вплив концентрації осаду на параметри фільтрації, причому деякі коефіцієнти процесу визначалися експериментально.

Метою даної роботи є просторове узагальнення математичної моделі очищення рідини від багатокomпонентного забруднення [4], де домінують

конвективні складові. Модель враховує зворотний вплив ключових факторів (концентрація забруднень і осаду) на характеристики середовища (пористість, дифузія) і містить додаткову умову перевизначення для визначення невідомого масообмінного коефіцієнта, а також побудову асимптотичного розв'язку нелінійної оберненої задачі.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧА

Розглядався зернистий (пористий) фільтр, що має форму криволінійного паралелепіпеда  $GZ = ABCDA * B * C * D *$ , обмежений гладкими ортогональними між собою в кутових точках і ребрах еквіпотенціальними поверхнями  $ABB_* A_* = \{z : f_1(x, y, z) = 0\}$ ,  $CDD_* C_* = \{z : f_2(x, y, z) = 0\}$  та поверхнями течії  $ADD_* A_* = \{z : f_3(x, y, z) = 0\}$ ,  $BCC_* B_* = \{z : f_4(x, y, z) = 0\}$ ,  $ABCD = \{z : f_5(x, y, z) = 0\}$ ,  $A_* B_* C_* D_* = \{z : f_6(x, y, z) = 0\}$ .

Аналогічно до [3] припускали, що частинки забруднюючих домішок можуть змінювати свій стан (процеси захоплення та відриву, сорбції та десорбції тощо), і при цьому концентрації забруднень впливають на властивості середовища, такого як пористість або коефіцієнт фільтрації. При цьому концентрація забруднень є багатокomпонентною:

$$C = C(x, y, z, t) = (C_1, \dots, C_m) = (C_1(x, y, z, t), \dots, C_m(x, y, z, t))$$

де  $C_i$  концентрація  $i$ -ої компоненти домішки ( $i = \overline{1, m}$ ) у рідкому фільтруючому середовищі. Відповідний процес фільтрування для області  $G = GZ \times (0, \infty)$  було описано наступною модельною задачею:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(\sigma(P)C_i)}{\partial t} &= \varepsilon\alpha_i(t)\rho_i - \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C_i - \beta_i \left( \sum_{p=1}^m q_p C_p \right) - \\ &- \varepsilon f_{m-1} \left( \sum_{p_1, \dots, p_u=1}^m h_{i, p_1, \dots, p_u} C_{i,0}^{y_i} C_{p_1}^{y_{p_1}} \dots C_{p_u}^{y_{p_u}} \right) + D_i \Delta C_i, \quad (1) \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= \left( \sum_{i=1}^m \beta_i C_i \right) - \varepsilon \alpha(t) P, \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned} \right.$$

$$C_i \Big|_{ABB, A_s} = C_{i,*}(M, t), \quad \frac{\partial C_i}{\partial \bar{n}} \Big|_{CDD, C_s} = 0,$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial \bar{n}} \Big|_{ADD, A_s \cup BCC, B_s \cup ABCD \cup A_s B_s C_s D_s} = 0,$$

$$C_i(x, y, z, 0) = C_{i,0}^0(x, y, z), \quad (2)$$

$$P(x, y, z, 0) = P_0^0(x, y, z)$$

$$\vec{v} = \kappa \nabla \varphi, \quad \nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (3)$$

$$\varphi \Big|_{ABB, A_s} = \varphi_*, \quad \varphi \Big|_{CDD, C_s} = \quad (4)$$

$$\varphi^*, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{n}} \Big|_{ADD, A_s \cup BCC, B_s \cup ABCD \cup A_s B_s C_s D_s} = 0$$

$$\alpha(t) \iiint_G P(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) d\tilde{x} d\tilde{y} d\tilde{z} = \mu(t) \quad (5)$$

де  $P(x, y, z, t)$  – концентрація осаду у внутрішній точці  $(x, y, z)$  області  $G$  (завантаження фільтра) в момент часу  $t$ ;  $\beta_i$  – коефіцієнти, що характеризують масові об'єми осадження домішок за одиницю часу,  $\alpha(t)$  – шуканий коефіцієнт, що характеризує масові об'єми відірваних від гранул завантаження частинок,  $\mu(t)$  – функція, що характеризує масові розподілу осаду з часом (знаходиться експериментальним способом [5]), (4) – умова пере визначення;  $\sigma(P)$  – пористість середовища ( $\sigma(P) = \sigma_0 - \varepsilon \sigma_* P(x, y, z, t)$ );  $\vec{\nabla}$  – оператор Гамільтона;  $\Delta = \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}$  – оператор Лапласа;  $D_i = d_{0i} \varepsilon$  – коефіцієнт дифузії домішки у рідині;  $\sigma_*$ ,  $d_{0i}$ ,  $\varepsilon$  – тверді параметри (характеризують відповідний м'який параметр  $\sigma(P)$ ), що знаходяться експериментальним способом,  $\varepsilon$  – малий параметр (він характеризує переваги одних складників процесу над іншими, а саме, десорбційні складники та явища міжкомпонентної взаємодії цього процесу є малими порівняно з іншими його складниками);  $C_i^*(M, t)$ ,  $C_{i,0}^0(x, y, z)$  – достатньо гладкі функції, узгоджені між собою на ребрах області  $G$ ;  $M$  – довільна точка відповідної поверхні;  $\varphi$  – фільтраційний потенціал ( $0 < \varphi_* \leq \varphi \leq \varphi^* < \infty$ );  $\vec{v}(v_x, v_y, v_z)$  – вектор швидкості фільтрації ( $|\vec{v}| > v_* \gg \varepsilon$ ),  $\kappa$  – коефіцієнт фільтрації.

### III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Розв'язок поставленої задачі з точністю  $O(\varepsilon^n)$  знайдено у вигляді асимптотичних рядів [3, 4]:

$$c_i = c_{i,0} + \sum_{j=1}^n \varepsilon^j c_{i,j} + \sum_{j=0}^n \varepsilon^j \Pi_{i,j} + \sum_{j=0}^n \varepsilon^j \tilde{\Pi}_{i,j} + \sum_{j=0}^{n+1} \varepsilon^{j/2} \tilde{\tilde{\Pi}}_{i,j} + \sum_{j=0}^{n+1} \varepsilon^{j/2} \tilde{\tilde{\tilde{\Pi}}}_{i,j} + R_{c,i} \quad (6)$$

$$\rho = \rho_0 + \sum_{j=1}^n \varepsilon^j \rho_j + \sum_{j=0}^n \varepsilon^j \bar{P}_j + \sum_{j=0}^n \varepsilon^j \tilde{P}_j + \sum_{j=0}^{n+1} \varepsilon^{j/2} \tilde{\tilde{P}}_j + \sum_{j=0}^{n+1} \varepsilon^{j/2} \tilde{\tilde{\tilde{P}}}_j + R_\rho \quad (7)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \sum_{j=1}^k \varepsilon^j \alpha_j + R_\alpha \quad (8)$$

де  $R_{c,i}(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$ ,  $R_\rho(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$ ,  $R_\alpha(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$  – залишкові члени,  $c_{i,j}(\varphi, \psi, \eta, t)$ ,  $\rho_j(\varphi, \psi, \eta, t)$ ,  $\alpha_j(t)$  – члени регулярної частини асимптотики ( $i = \overline{1, m}$ ;  $j = \overline{0, n}$ );  $\Pi_{i,j}(\xi, \psi, \eta, t)$ ,  $\bar{P}_j(\xi, \psi, \eta, t)$  – функції типу примежового шару в околі  $\varphi = \bar{\varphi}^*$  (поправки на виході з фільтра) ( $j = \overline{0, 2}$ ),  $\tilde{\Pi}_{i,j}(\tilde{\xi}, \psi, \eta, t)$ ,  $\tilde{P}_j(\tilde{\xi}, \psi, \eta, t)$  – в околі  $\varphi = \bar{\varphi}^*$  (поправки на вході у фільтр) ( $j = \overline{0, 2}$ ), а функції  $\tilde{\tilde{\Pi}}_{i,j}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t)$ ,  $\tilde{\tilde{\tilde{\Pi}}}_{i,j}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t)$ ,  $\tilde{\tilde{\Pi}}_{i,j}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t)$ ,  $\tilde{\tilde{\tilde{\Pi}}}_{i,j}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t)$  та  $\tilde{P}_j(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t)$ ,  $\tilde{\tilde{P}}_j(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t)$ ,  $\tilde{P}_j(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t)$ ,  $\tilde{\tilde{P}}_j(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t)$  ( $j = \overline{0, 3}$ ) – в околах  $\psi = 0$ ,  $\psi = Q^*$ ,  $\eta = 0$ ,  $\eta = Q^*$  (поправки в околі бічних «стінок» фільтра), відповідно;  $\xi = (\varphi^* - \varphi)/\varepsilon$ ,  $\tilde{\xi} = (\varphi - \varphi_*)/\varepsilon$ ,  $\tilde{\psi} = \psi/\sqrt{\varepsilon}$ ,  $\tilde{\tilde{\psi}} = (Q_* - \psi)/\sqrt{\varepsilon}$ ,  $\tilde{\eta} = \eta/\sqrt{\varepsilon}$ ,  $\tilde{\tilde{\eta}} = (Q^* - \eta)/\sqrt{\varepsilon}$  – «розтяги» відповідних змінних.

Для фільтра характерна значна просторовість засипки, «поступове звуження» в напрямку від входу до виходу, що підтверджується практичним досвідом. Крім того, важливою є взаємна ортогональність граней уздовж ребер та в кутових точках, що значно спрощує процес побудови просторового конформного відображення.

На рис. 1 проілюстровано розподіл концентрації  $c_1, c_2$  і  $\rho$  з часом вздовж ліній течії для  $L = 1\text{ м}$ ,  $\beta_i = 0.28 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\alpha_0 = 0.0053 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\sigma_0 = 0.51$ ,  $\varepsilon = 0.00097$ ;  $k = 1$ ;  $c_{1,0}^0(\varphi, \psi, \eta) = 0.016 \exp(-\varphi^2)$ ,  $c_{2,0}^0(\varphi, \psi, \eta) = 0.022 \exp(-\varphi^2)$ ,  $c_1^*(\psi, \eta, t) = 0.016$ ,  $c_2^*(\psi, \eta, t) = 0.022$ ,  $\rho_0^0(\varphi, \psi, \eta) = 0$ .

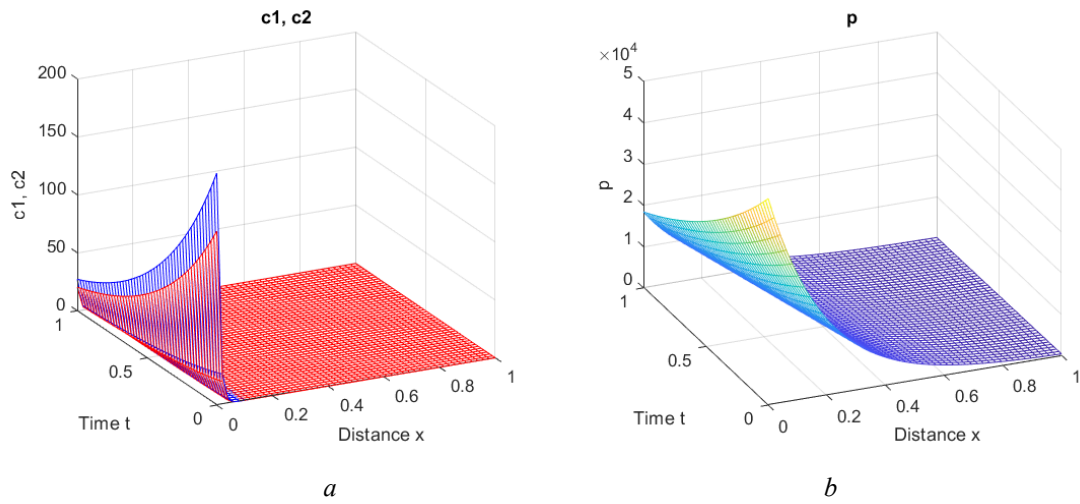


Рис. 1. Просторовий розподіл концентрації  $c_1, c_2$  - (a) і  $\rho$  - (b)

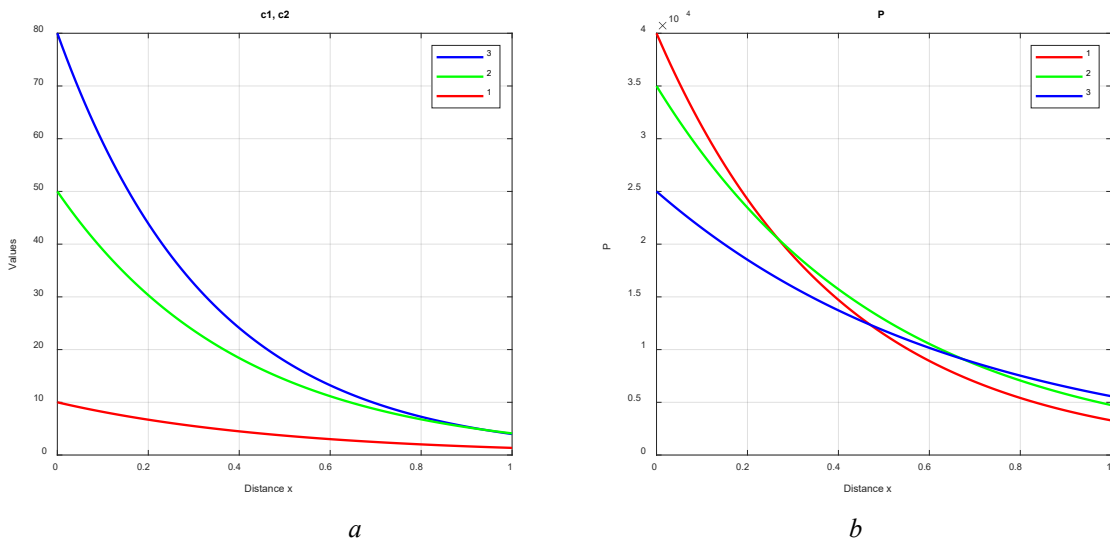


Рис.2. Розподіл концентрації  $c_1, c_2$  - (a) і  $\rho$  - (b) вздовж фільтра в різні моменти часу (для  $t_1 = 10$  год,  $t_2 = 20$  год,  $t_3 = 30$  год)

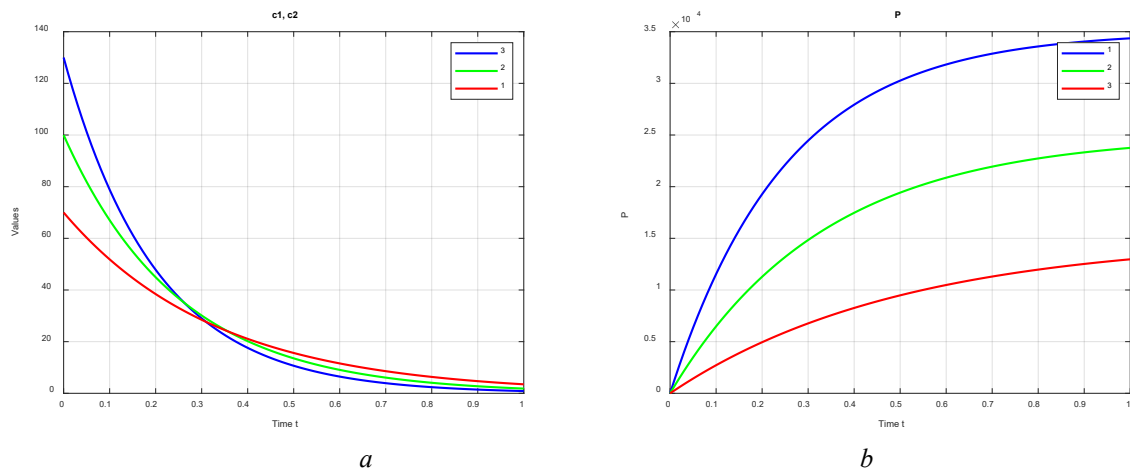


Рис.3. Розподіл концентрації  $c_1, c_2$  - (a) і  $\rho$  - (b) з часом в різних поперечних перерізах фільтра (для  $x_1 = 25$  см,  $t_2 = 50$  см,  $t_3 = 75$  см)

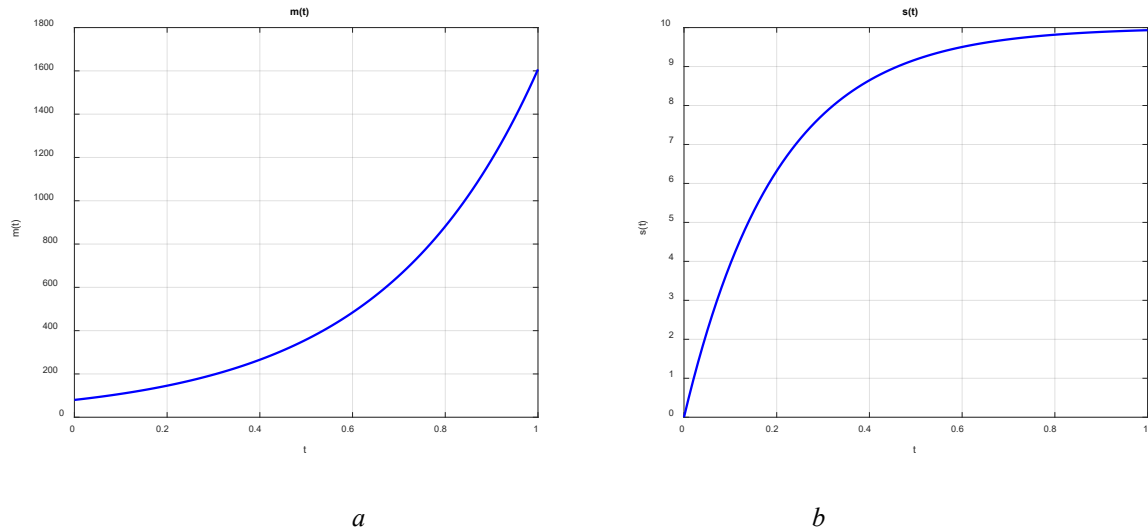


Рис.4. Масовий розподіл осаду  $\mu(t)$  - (a) і відповідного масо обмінного коефіцієнта  $\alpha(t)$  - (b) з часом

На рисунках 2 і 3 показано розподіл концентрацій  $c_1, c_2$  і  $\rho$  у часі та в різних поперечних перерізах фільтра вздовж ліній потоку. В результаті інтерполяції експериментальних даних [5], нами отримано масовий розподіл осаду  $\mu(t)$  у часі (рис. 4a). Залежність масообмінного коефіцієнта  $\alpha(t)$  від часу представлено на рисунку 4б. Збільшення масообмінного коефіцієнта з часом пояснюється тим, що в даному випадку, при експериментально визначеному значенні  $\mu(t)$ , під час осадження частинок гранули пористого матеріалу максимально насичуються домішковими частинками. Під дією гідравлічного напору зростає ймовірність відриву частинок від гранул до моменту завершення ефективної роботи фільтра.

Порівнюючи ці результати з розрахунковими даними, отриманими в [4], видно, що розрахунки, засновані на просторово узагальненій математичній моделі процесу очищення рідини, можуть як позитивно, так і негативно характеризувати процес фільтрації, в залежності від форми просторового фільтра.

#### IV. ВИСНОВКИ

Запропоновано просторове узагальнення математичної моделі очищення рідини від багатоконпонентних забруднень, де домінують конвективні складові. Модель враховує зворотний вплив ключових факторів (концентрації забруднень і осаду) на властивості середовища, такі як коефіцієнт пористості та дифузії, і включає спеціальну умову перевизначення для визначення невідомого масообмінного коефіцієнта. Розв'язок оберненої задачі дозволяє суттєво наблизити числові

результати до експериментальних даних у порівнянні з класичними моделями [5], що забезпечує точніше прогнозування та розрахунок ефективності осадження домішок у різних водно-дисперсних системах. Аналіз показав, що форма фільтра значно впливає на параметри фільтрації та загальну продуктивність. У подальших дослідженнях планується моделювання фільтраційних процесів за умов неповних даних та їх автоматизація (див. [4, 5, 6]).

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Маринець, В & Когутич, О & Питьовка, О. (2023). Один підхід дослідження математичної моделі поширення вологи у пористих середовищах. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Математика і інформатика. 43. 42-51. 10.24144/2616-7700.2023.43(2).42-51.
- [2] Бомба А.Я. Числово-асимптотичне наближення розв'язків просторових модельних задач процесу фільтрування / Андрій Бомба, Юрій Климок, Андрій Сафоник, Віктор Сівак. // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2010. – Вип. 11. – С. 29-38.
- [3] Бомба А.Я. Нелінійні задачі типу фільтрація-конвекція-дифузія-масообмін за умов неповних даних / Бомба А. Я., Гаврилюк В.І., Сафоник А.П., Фурсачик О.А. // Монографія. – Рівне : НУВГП, 2011. – 276 с.
- [4] Бомба А.Я. Математическое моделирование процесса фильтрования жидкости от многокомпонентного загрязнения с учетом обратного влияния характеристик процесса на характеристики среды / Бомба А.Я., Сафоник А.П. // Проблемы управления и информатики. 2013. – № 2. – С. 49–54.
- [5] Volk, Liubov & Безусьяк, Олександр. (2023). Коефіцієнт гідравлічного опору в трубах з однорідною зернистою шорсткістю. Modeling Control and Information Technologies. 210-211. 10.31713/MCIT.2023.064.
- [6] Сергиенко І.В., Дейнека В.С. Идентификация градиентными методами параметров задач диффузии вещества в нанопористой среде // Проблемы управления и информатики. – 2010. – №6. С. – 5-18.

# Збіжність методу операторної екстраполяції для варіаційних нерівностей

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.100>

Володимир Семенов  
КНУ імені Тараса Шевченка  
м. Київ, Україна  
[semenov.volodya@gmail.com](mailto:semenov.volodya@gmail.com)

Олександра Коваленко  
КНУ імені Тараса Шевченка  
м. Київ, Україна  
[alexandra.kovalenko@gmail.com](mailto:alexandra.kovalenko@gmail.com)

Денис Чергикало  
КНУ імені Тараса Шевченка  
м. Київ, Україна  
[denischergicalo@gmail.com](mailto:denischergicalo@gmail.com)

**Анотація** – Розглядаються варіаційні нерівності з монотонними операторами, що діють в гільбертовому просторі. Доведено теореми збіжності та оцінки швидкості збіжності для різних варіантів методу операторної екстраполяції. Також запропоновано адаптивний та регуляризований варіанти методу.

**Ключові слова** – варіаційна нерівність; збіжність; метод операторної екстраполяції; монотонність

операторної екстраполяції для задач з монотонними операторами [5–7].

Робота виконана за фінансової підтримки МОН України (проект «Обчислювальні алгоритми і оптимізація для штучного інтелекту, медицини та оборони», 0122U002026) та НАН України (проект «Нові субградієнтні та екстраградієнтні методи для негладких задач регресії», 0124U002162).

## I. ВСТУП

Розглянемо варіаційну нерівність:

$$\text{знайти } x \in C : \langle Ax, y - x \rangle \geq 0 \quad \forall y \in C, \quad (1)$$

де  $C$  – непорожня підмножина гільбертового простору  $H$ ,  $A$  – оператор, що діє з  $H$  в  $H$ . Множину розв’язків (1) позначимо  $S$ .

Припустимо, що виконані такі умови: множина  $C \subseteq E$  – опукла та замкнена; оператор  $A : H \rightarrow H$  – монотонний та ліпшицевий на  $C$  з константою  $L > 0$ ; множина  $S$  непорожня.

Задача (1) – зручна форма запису різних задач, що виникають в математичній фізиці, дослідженні операцій та машинному навчанні [1–3].

Окремі задачі негладкої оптимізації можна розв’язувати, якщо їх формулювати у вигляді сідлових задач і застосовувати алгоритми розв’язання варіаційних нерівностей [2]. А з початком використання GANs (генерувальних змагальних нейронних мереж) та інших моделей змагального навчання зацікавленість в алгоритмах розв’язання сідлових задач та варіаційних нерівностей з’явилася серед багатьох спеціалістів з машинного навчання [3].

Одним з методів апроксимації розв’язків варіаційних нерівностей (1) є алгоритм операторної екстраполяції [4–7].

Мета повідомлення – ознайомити з результатами про характер збіжності нових варіантів алгоритму

## II. ОПЕРАТОРНА ЕКСТРАПОЛЯЦІЯ

Для розв’язання варіаційної нерівності (1) в роботі [4] запропоновано наступний алгоритм.

### Алгоритм 1 ([4]).

**Ініціалізація.** Обираємо  $x_0 = x_1 \in H$ ,  $\lambda_n > 0$ .

**Ітерації.** Генеруємо послідовність  $(x_n)$ :

$$x_{n+1} = P_C(x_n - \lambda_n Ax_n - \lambda_{n-1}(Ax_n - Ax_{n-1})),$$

де  $P_C$  – оператор метричного проектування на  $C$ .

Умова зупинки має вигляд

$$x_{n+1} = x_n = x_{n-1}.$$

Зауважимо, що алгоритм 1 автори [4] називали «forward-reflected-backward algorithm».

Відносно додатніх параметрів  $\lambda_n$  припустимо виконання такої умови:

$$0 < \inf_n \lambda_n \leq \sup_n \lambda_n < 1/2L. \quad (2)$$

## III. СЛАБКА ЗБІЖІСТЬ

Має місце

**Лема 1.** Для послідовності  $(x_n)$ , що породжена алгоритмом 1, виконується нерівність

$$\|x_{n+1} - z\|^2 + 2\lambda_n \langle Ax_n - Ax_{n+1}, x_{n+1} - z \rangle + \lambda_n L \|x_{n+1} - x_n\|^2 \leq$$

$$\leq \|x_n - z\|^2 + 2\lambda_{n-1} \langle Ax_{n-1} - Ax_n, x_n - z \rangle + \\ + \lambda_{n-1} L \|x_n - x_{n-1}\|^2 - \\ - (1 - \lambda_{n-1} L - \mu \lambda_n L) \|x_{n+1} - x_n\|^2,$$

де  $z \in S$ .

**Теорема 1.** Нехай  $C$  – непорожня опукла та замкнена підмножина гільбертового простору  $H$ ,  $A: H \rightarrow H$  – монотонний та ліпшицевий на множині  $C$  оператор,  $S \neq \emptyset$ , також виконується умова (2). Тоді послідовність  $(x_n)$ , що породжена алгоритмом 1, слабо збігаються до деякої точки  $z \in S$ .

У статті [5] аналогічний теоремі 1 результат отримано для задач в 2-рівномірно опуклих та рівномірно гладких банахових просторах

Однією з основних теоретичних задач є оцінка числа ітерацій алгоритму, що необхідне для отримання наближеного розв'язку заданої якості.

Якість наближеного розв'язку  $x \in C$  варіаційної нерівності (1) будемо оцінювати за допомогою невід'ємної функції зазору (gap function) [2]

$$\text{gap}(x) = \sup_{y \in C} \langle Ay, x - y \rangle.$$

Очевидно, що для коректності означення функції зазору необхідна обмеженість допустимої множини  $C$ . Якщо оператор  $A$  є монотонний та  $x \in C$  – розв'язок задачі (1), то  $\text{gap}(x) = 0$ . Навпаки, якщо для  $x \in C$  маємо  $\text{gap}(x) = 0$ , то  $x$  – розв'язок (1).

У випадку обмеженості допустимої множини  $C$  доведено, що алгоритму 1 необхідно зробити  $O(LD^2 \varepsilon^{-1})$  ітерацій для отримання точки  $x \in C$  з  $\text{gap}(x) \leq \varepsilon$ ,  $\varepsilon > 0$ , де  $D = \text{diam } C < +\infty$ .

**Теорема 2.** Нехай  $(x_n)$  – послідовність, що породжена алгоритмом 1. Нехай  $\lambda_n \in (0, 1/2L]$ . Тоді для послідовності цезарівських середніх

$$z_{N+1} = \frac{\sum_{n=1}^N \lambda_n x_{n+1}}{\sum_{n=1}^N \lambda_n}$$

має місце нерівність

$$\text{gap}(z_{N+1}) \leq \frac{1}{2 \sum_{n=1}^N \lambda_n} \sup_{y \in C} \|y - x_1\|^2.$$

**Теорема 3.** Нехай  $(x_n)$  – послідовність, що породжена алгоритмом 1 з  $\lambda_n = 1/2L$ . Тоді для послідовності середніх

$$z_{N+1} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{n+1}$$

має місце оцінка

$$\text{gap}(z_{N+1}) \leq \frac{LD^2}{N}.$$

#### IV. СИЛЬНА ЗБІЖНІСТЬ

У випадку сильної монотонності оператора  $A$  можна гарантувати сильну збіжність алгоритму 1.

Більш того, для окремих модифікацій алгоритму операторної екстраполяції доведено оцінки лінійної швидкості збіжності [6].

Наприклад, розглянемо такий алгоритм.

#### Алгоритм 2 ([6]).

Для  $x_1 = x_0 \in C$  генеруємо послідовність  $(x_n)$ :

$$x_{n+1} = P_C \left( x_n - \frac{1}{2L} Ax_n - \frac{1}{2(L+\mu)} (Ax_n - Ax_{n-1}) \right),$$

де  $\mu, L > 0$  – константи сильної монотонності та ліпшицевості оператора  $A$ .

Має місце

**Теорема 4.** Нехай  $C$  – непорожня опукла замкнена підмножина гільбертового простору  $H$ ,  $A: H \rightarrow H$  – ліпшицевий та сильно монотонний на множині  $C$  оператор. Тоді для породженої алгоритмом 2 послідовності  $(x_n)$  виконується оцінка

$$\|x_{n+1} - z\|^2 \leq \left(1 - \frac{\mu}{L+\mu}\right)^n 2 \|x_1 - z\|^2, \quad n \geq 1,$$

де  $z \in C$  – єдиний розв'язок задачі (1).

У випадку відсутності сильної монотонності можна гарантувати лише слабку збіжність. Але спираючись на відомий ітераційний алгоритм Гальперна для апроксимації нерухомих точок нерозтягуючих операторів [1] побудовано такий регуляризований варіант алгоритму 1.

#### Алгоритм 3 ([7]).

**Ініціалізація.** Задаємо елементи  $y \in H$ ,  $x_0, x_1 \in C$ , послідовність чисел  $\lambda_n > 0$  та таку послідовність  $(\alpha_n)$ , що  $\alpha_n \in (0, 1)$ ,  $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0$ ,  $\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n = +\infty$ .

**Ітерації.** Генеруємо послідовність  $(x_n)$ :

$$x_{n+1} = P_C \left( \alpha_n y + (1 - \alpha_n) x_n - \lambda_n Ax_n - \right. \\ \left. - (1 - \alpha_n) \lambda_{n-1} (Ax_n - Ax_{n-1}) \right).$$

Відносно додатніх параметрів  $\lambda_n$  припустимо виконання умови (2).

Сформулюємо результат про сильну збіжність алгоритму 3.

**Лема 2.** Для послідовності  $(x_n)$ , що породжена алгоритмом 3, виконується нерівність

$$\|x_{n+1} - z\|^2 + 2\lambda_n \langle Ax_n - Ax_{n+1}, x_{n+1} - z \rangle + \frac{1}{2} \|x_{n+1} - x_n\|^2 \leq \\ \leq (1 - \alpha_n) \left( \|x_n - z\|^2 + 2\lambda_{n-1} \langle Ax_{n-1} - Ax_n, x_n - z \rangle + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \|x_n - x_{n-1}\|^2 \right) + 2\alpha_n \langle y - z, x_{n+1} - z \rangle - \\ - \left( \frac{1}{2} - \alpha_n - (1 - \alpha_n) \lambda_{n-1} L \right) \|x_{n+1} - x_n\|^2 -$$



$$-(1-\alpha_n)\left(\frac{1}{2}-\lambda_{n-1}L\right)\|x_n-x_{n-1}\|^2,$$

де  $z \in S$ .

**Теорема 4.** Нехай  $C$  – непорожня опукла та замкнена підмножина гільбертового простору  $H$ ,  $A: H \rightarrow H$  – монотонний та ліпшицевий на множині  $C$  оператор,  $S \neq \emptyset$ ,  $y \in H$ , виконується умова (2). Тоді послідовність  $(x_n)$ , що породжена алгоритмом 3, сильно збігається до точки  $z = P_S y$ .

Параметри  $\lambda_n$  в алгоритмі 3 задавались виходячи з нерівності (2). Тобто, явно використовувалась інформація про константу ліпшицевості оператора  $A$ . Алгоритм 3 та адаптивна схема з статті [5] дозволяє побудувати такий алгоритм з адаптивним вибором величини  $\lambda_n$ , що не вимагає знання ліпшицевих констант операторів та процедур типу лінійного пошуку.

#### Алгоритм 4.

**Ініціалізація.** Задаємо елементи  $y \in H$ ,  $x_0, x_1 \in C$ , числа  $\tau \in (0, \frac{1}{2})$ ,  $\lambda_1, \lambda_0 > 0$ , таку послідовність  $(\alpha_n)$ , що  $\alpha_n \in (0, 1)$ ,  $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0$ ,  $\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n = +\infty$ .

**Ітерації.** Генеруємо послідовність  $(x_n)$ :

$$x_{n+1} = P_C \left( \alpha_n y + (1-\alpha_n)x_n - \lambda_n A x_n - (1-\alpha_n)\lambda_{n-1}(A x_n - A x_{n-1}) \right),$$

$$\lambda_{n+1} = \begin{cases} \min \left\{ \lambda_n, \tau \frac{\|x_{n+1} - x_n\|}{\|A x_{n+1} - A x_n\|_*} \right\}, & \text{якщо } A x_{n+1} \neq A x_n, \\ \lambda_n, & \text{інакше.} \end{cases}$$

Має місце аналогічний теоремі 4 про сильну збіжність алгоритму 4 до точки  $z = P_S y$ .

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Семенов В.В. Вариційні нерівності: теорія та алгоритми. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2021, 167 с.
- [2] A. Nemirovski, “Prox-method with rate of convergence  $O(1/T)$  for variational inequalities with Lipschitz continuous monotone operators and smooth convex-concave saddle point problems.” SIAM J. on Optim., vol. 15, 2004, pp. 229–251.
- [3] G. Gidel, H. Berard, P. Vincent, S. Lacoste-Julien, “A Variational Inequality Perspective on Generative Adversarial Networks,” arXiv preprint arXiv:1802.10551, 2018.
- [4] Y. Malitsky, M.K. Tam, “A Forward-Backward Splitting Method for Monotone Inclusions Without Cocoercivity,” SIAM J. on Optim., vol. 30, 2020, pp. 1451–1472.
- [5] V.V. Semenov, S.V. Denisov, G.V. Sandrakov, O.S. Kharkov, “Convergence of the Operator Extrapolation Method for Variational Inequalities in Banach Spaces,” Cybernetics and Systems Analysis, vol. 58, 2022, pp. 740–753.
- [6] V.V. Semenov, O.S. Kharkov, “Convergence Rate of the Extrapolation from the Past and Operator Extrapolation Algorithms,” Cybernetics and Systems Analysis, vol. 60, 2024, pp. 783–791.
- [7] V.V. Semenov, O.S. Kharkov, “Strong Convergence of the Regularized Operator Extrapolation Algorithm for Variational Inequalities,” Cybernetics and Systems Analysis, vol. 60, 2024, pp. 392–402.

# Математичне моделювання транспортних потоків дорожньої мережі на основі гідродинамічної аналогії

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.101>

Анатолій Сохацький

Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України

Кафедра транспортних технологій та міжнародної логістики

Університет митної справи та фінансів

Дніпро, Україна

[Sokhatsky\\_anatoly@ukr.net](mailto:Sokhatsky_anatoly@ukr.net)

*Анотація* — В теорії транспортних потоків існують різноманітні підходи та ряд класифікацій їх математичних моделей. Однією з найпоширеніших є класифікація на макроскопічні моделі та мікроскопічні моделі. В макроскопічних моделях розглядається ціла група транспортних засобів, яка описується відповідними параметрами руху. Мікроскопічні моделі ґрунтуються на концепції окремого транспортного засобу та підтримки безпечної відстані до лідера. Найбільш відомими моделями є модель оптимальної швидкості, модель слідування за лідером, модель розумного водія

Метою роботи є побудова математичної моделі, числового методу, алгоритму розв'язування задачі та розробка комплексу програмного забезпечення для дослідження динаміки транспортних потоків.

В роботі розглядається задача моделювання транспортного потоку автомобільних транспортних засобів на основі гідродинамічної аналогії. Для математичного опису фізичного процесу використано систему диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса. Складності, що виникають при опису транспортного потоку схожі зі складностями, які виникають при описі турбулентного руху рідини.

Розроблено методику, алгоритм розв'язування задачі, та програмне забезпечення. Для числового інтегрування системи диференціальних рівнянь використано скінченно-об'ємний метод. Проведено тестування розробленої методики. За результатами числових розрахунків побудовано фундаментальну діаграму транспортного потоку.

**Ключові слова** — транспортні потоки, макроскопічні моделі, числове моделювання, рівняння Нав'є-Стокса.

## I. ВСТУП

Математичне моделювання транспортних потоків і на сьогодні є доволі складною та актуальною задачею [1-5,8]. Найбільш досконалі математичні моделі транспортних потоків описуються рівняннями математичної фізики.

Математичне моделювання транспортних потоків і на сьогодні є доволі складною та актуальною задачею. Найбільш досконалі математичні моделі транспортних потоків описуються рівняннями математичної фізики.

Реальні транспортні потоки автомобільних транспортних засобів є складними і створюють проблеми транспортного сполучення в містах. Фізичне дослідження цих процесів пов'язане з значними матеріальними і фінансовими затратами. Застосування математичного моделювання для дослідження процесів в транспортних потоках є ефективним інструментом розв'язування поставлених задач та пошуку ефективних шляхів покращення використання транспортної інфраструктури. Проте їх математичне моделювання і на сьогодні залишається складною проблемою обчислювальної динаміки транспортних потоків.

## II. СТАН МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

В теорії транспортних потоків існують різноманітні підходи до класифікації їх математичних моделей [5,8]. Однією з поширених є класифікація на макроскопічні моделі та мікроскопічні моделі. В макроскопічних моделях розглядається ціла група транспортних засобів, яка описується відповідними параметрами руху. Мікроскопічні моделі ґрунтуються на концепції підтримки безпечної відстані до лідера. Найбільш відомими моделями є модель оптимальної швидкості, модель слідування за лідером, модель розумного водія Трайбера [8].

Макроскопічні моделі транспортних потоків можна отримувати з кінетичних моделей, подібно до того, як у кінетичній теорії отримують рівняння газової динаміки. Тобто за допомогою домноження на різні функції від швидкості, і подальшого інтегрування за швидкостями кінетичного рівняння для густини в розширеному фазовому просторі  $(t; x; v)$ .

В результаті таких дій буде виходити ланцюжок рівнянь, що зачіпляються. Так, якщо помножити кінетичне рівняння на одиницю і проінтегрувати, то

отримаємо рівняння для густини, яке відображає закон збереження маси. Проте туди буде входити середня швидкість. Якщо ж домножити кінетичне

рівняння на швидкість і проінтегрувати, то отримаємо рівняння для середньої швидкості, тобто - закон збереження імпульсу сили. До нього також входить варіація швидкості. По суті, вона визначається середнім значенням квадрата швидкості.

Якщо помножити кінетичне рівняння на квадрат швидкості та потім проінтегрувати, то отримаємо рівняння для середнього значення квадрата швидкості. Звідки можна отримати рівняння для варіації швидкості, до якого входить середнє значення куба швидкості.

Доводиться в певний момент перетворень замикає цей ланцюжок, виходячи з додаткових фізичних міркувань та аналізу процесу, формулюючи певні гіпотези. Це можуть бути результати експерименту. Для замикання моментного ланцюжка приходить вводити певні співвідношення. Ці співвідношення служать додатковими рівняння між величинами, що входять у ці рівняння. Так, для газу в залежності від цих співвідношень виходить модель ідеального газу або модель в'язкого теплопровідного газу – тобто модель Нав'є-Стокса.

Слід зазначити, що є також моделі, проміжні між кінетичними і гідродинамічними моделями. Це так звані мезоскопічні моделі.

У зв'язку з вище приведеним доречно зауважити, що класичним завданням статистичної фізики є дослідження переходу від рівняння Больцмана до рівнянь гідродинаміки або газодинаміки.

Проте центральним місцем залишається проблема замикання моментного ланцюжка для розв'язування рівняння Больцмана.

Відповідно широке розповсюдження отримали моделі транспортних потоків, які будуються на основі гідродинамічної аналогії цих стисливих потоків.

Однією з перших макроскопічних моделей є модель Лайтхілла–Уізема–Річардса (LWR). В ній потік автомобільних транспортних засобів розглядається як одномірний потік стисливої рідини. В моделі LWR приймається, що існує взаємний однозначний зв'язок поміж швидкістю та густиною потоку, та виконуються закони збереження маси.

Потім з'явилися і інші макроскопічні моделі, що ґрунтувалися на аналогах транспортного потоку гідродинамічним особливостям течії стисливої рідини. Це модель Танака, Уізема, Пейна та інші. В 1995 році з'явилася модель Хельбінга–Ейлера–На'є–Стокса. В цій моделі до системи рівнянь Пейна додається третє рівняння, що відображає закон збереження енергії для варіації швидкості. В друге рівняння (закон збереження імпульсу) вводиться додаткова складова що дозволяє враховувати варіацію швидкості. Слід відмітити, що для системи рівнянь Нав'є-Стокса не відомо, як поставити початкову крайову задачу Коші, щоб глобальний розв'язок був єдиним при всіх

значеннях часу. За вирішення цієї проблеми математичний інститут Клея США в 2000 році призначив премію в один мільйон доларів

Загальним фактом відмінностей гідродинамічних моделей транспортних потоків від відповідних гідродинамічних аналогів полягає в записі правої частини рівнянь. Це відноситься до коректного запису, як правило, гіперболічних систем рівнянь та їх дифузійних аналогів.

Слід зауважити, що складнощі, які виникають при опису динаміки транспортного потоку схожі зі складнощами, що виникають при описі турбулентного руху стислої рідини [6,7].

Використання математичного моделювання для дослідження динаміки транспортних потоків є ефективним інструментом для підвищення пропускної спроможності автомагістралей та підвищення безпеки руху. Розробка математичних моделей транспортних процесів є актуальним та важливим завданням. Метою роботи є побудова математичної моделі, числового методу, алгоритму розв'язування задачі та створення програмного забезпечення для дослідження динаміки транспортних потоків.

### III. Постановка задачі

Для моделювання динаміки транспортних засобів на дорожній мережі використано систему рівняння Нав'є-Стокса записаних в двовимірній системі координат.

Дорожня мережа в загальному випадку має складну геометричну форму. У зв'язку з цим застосовуємо криволінійну систему координат. Для переходу до такої системи координат введемо

$$\begin{cases} x = x(\xi, \eta) \\ y = y(\xi, \eta) \end{cases} \quad (1)$$

Якобіан перетворення системи координат запишемо у вигляді

$$j = \begin{vmatrix} \xi_x & \xi_y \\ \eta_x & \eta_y \end{vmatrix} \quad (2)$$

Метричні коефіцієнти виражаються співвідношеннями

$$\begin{aligned} \xi_x &= j\eta_y, & \eta_x &= -j\xi_y, \\ \xi_y &= -j\eta_x, & \eta_y &= j\xi_x. \end{aligned} \quad (3)$$

Згідно правил диференціювання складної функції маємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} &= \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta}, \\ \frac{\partial}{\partial y} &= \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta}. \end{aligned} \quad (4)$$

Введемо контраваріантні складові вектора швидкості

$$\begin{cases} U = \xi_x u + \xi_y v \\ V = \eta_x u + \eta_y v \end{cases} \quad (5)$$

де  $u, v$  – складові вектора швидкості транспортного потоку.

Так як дорожня мережа має складну геометрію вихідну систему диференціальних рівнянь для випадку для досконалого стисливого газу записано в криволінійній системі координат записані в наступному вигляді:

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} = 0, \quad (6)$$

де  $Q$  – вектор невідомих змінних;  $E, F$  – вектори нев'язких потоків;

Вектори  $Q, E, F$ , визначаються наступними співвідношеннями

$$Q = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \end{bmatrix}, E = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho U u + \xi_x p \\ \rho U v + \xi_y p \end{bmatrix}, F = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho V u + \eta_x p \\ \rho V v + \eta_y p \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де  $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$ , – метричні коефіцієнти,  $J = \partial(\xi, \eta) / \partial(x, y)$  – якобіан перетворення координат,  $u, v$  – складові вектора швидкості транспортного потоку,  $\rho$  – щільність транспортного потоку,  $p = f_\rho \cdot \rho$

Вважалось, що компоненти вектори теплових та в'язких потоків не впливають на динаміку транспортного потоку.

#### IV. Розв'язування задачі

Транспортний потік розглядається, як аналог потоку стисливої рідини. Проте певними фізичними явищами, що характерні для стисливої рідини в деякому наближенні можна знехтувати. В розробленій методиці не враховується рівняння енергії, тензори напружень та вектори теплових потоків. Виходячи з залежності (4) співвідношення для тиску слід визначати, як функцію від густини потоку.

Для числового розв'язування системи рівнянь (6) використано метод контрольного об'єму. Основні засади методу контрольного об'єму (МКО) полягають в тому, що розглядаються класичні рівняння балансу деякої величини  $Q$  в контрольному об'ємі  $V$ , обмеженому поверхнею  $S = \sum S_k$  з зовнішньою нормаллю  $\vec{n}$ .

Отримана система алгебраїчних рівнянь розв'язувалася методом Ейлера. Розроблена методика, алгоритм та програмне забезпечення тестувалося на ряді стандартних задач.

Таким чином для прогнозування транспортних потоків роблено методику розрахунку, алгоритм та написано програмне забезпечення. Для апроксимації конвективних складових вихідного рівняння переносу імпульсу використано

модифіковану протипотокову схему. Відповідно, розроблено механізм апроксимації значень шуканих функцій на гранях контрольного об'єму, який гарантує уникнення некоректних негативних швидкостей транспортних засобів. Алгоритм розроблено таким чином, щоб забезпечити виконання законів збереження (рис.1).

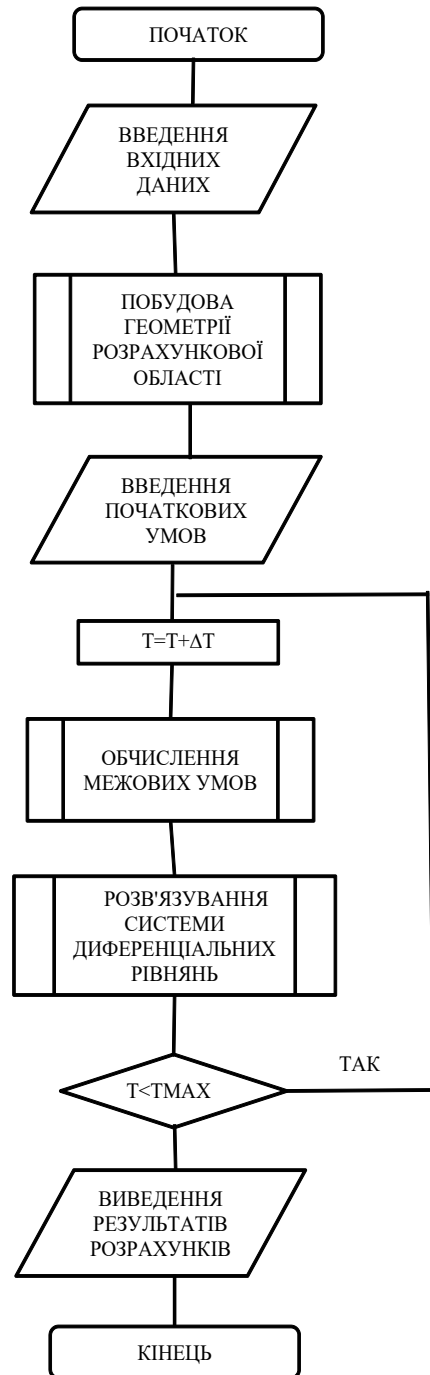


Рис. 1. Алгоритм розв'язування задачі

Члени рівнянь правої частини переносу імпульсу звичай апроксимуються за центрально-різницевою схемою. Фізичні процеси формування тензору напружень динаміки стисливої рідини

відрізняються від фізичних процесів в потоці автомобільних транспортних засобів. Ця особливість враховувалась при розрахунку правих часті рівнянь переносу імпульсу.

За результатами проведених числових розрахунків побудовано залежності інтенсивності руху транспортних засобів як функцію від густини потоку. На рис. 2. показано графік отриманих залежностей. Видно, що результати розрахунків узгоджуються з даними фундаментальної діаграми [8].

Вихідна система рівнянь записувалась та розв'язувалась в криволінійній двовимірній системі координат. Програмне забезпечення написано автором на мові програмування FORTRAN-95.

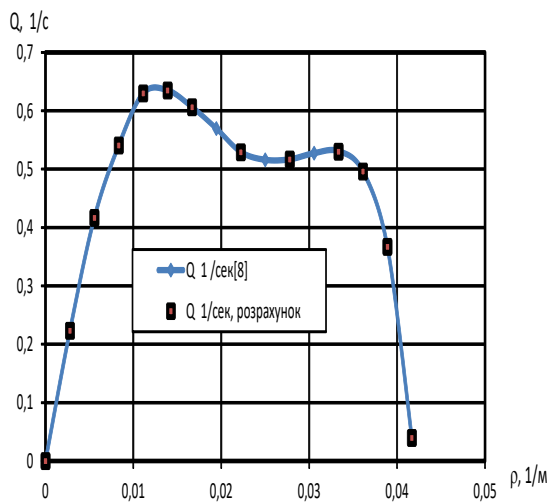


Рис. 2 Фундаментальна діаграма

### ВИСНОВКИ

В роботі розглядається задача моделювання транспортного потоку автомобільних транспортних засобів. Для опису фізичного процесу використано систему рівняння Нав'є-Стокса. Розроблено методику, алгоритм розв'язування задачі, та програмне забезпечення. Для числового інтегрування системи диференціальних рівнянь використано скінченно-об'ємний метод. Проведено тестування розробленої методики. За результатами числових розрахунків побудовано фундаментальну діаграму транспортного потоку.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] *Lighthill M. J., Whitham G. B.* On kinematic waves. II. Theory of traffic flow on long crowded roads // Proc. R. Soc. London, Se. A. 1955. V. 229. P. 281–345.
- [2] *Richards P. I.* Shock Waves on the Highway // Oper. Res. 1956. V. 4. P. 42–51.
- [3] *Уизем Дж.* Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
- [4] *Хейм Ф.* Математическая теория транспортных потоков. М.: Мир, 1966.
- [5] *Дрю А.* Теория транспортных потоков и управление ими. “Транспорт”, 1972 г., стр. 1-424.
- [6] *Гарбарук А. В., Стрелец М.Х., Травин А.К., Шур М.Л.* Современные подходы к моделированию турбулентности. СПб. Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 234 с.
- [7] *Сохацький А. В.* Теоретичні основи створення аеродинамічних компонувань перспективних швидкісних транспортних апаратів: дис. доктора технічних наук: 05.07.01. Дніпропетровськ. 2010. 364 с.
- [8] Введение в математическое моделирование транспортных потоков/ / Гасников А.В., и др. / Под ред. А.В. Гасникова. М.: МФТИ, 2010. 362 с.

# Числове моделювання диференціальних рівнянь із запізненням

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.102>

Ігор Черевко  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича  
м. Чернівці, Україна  
i.cherevko@chnu.edu.ua

Тетяна Щур  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича  
м. Чернівці, Україна  
lunyk.tetiana@chnu.edu.ua

Віктор Диренко  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича  
м. Чернівці, Україна  
dyrenko.viktor@chnu.edu.ua

**Анотація** – У роботі для числового моделювання початкових задач із запізненням побудовані та обґрунтовані різницеві схеми, які є узагальненнями класичних різницевих схем. Запропоновано алгоритм автоматизації методу кроків для наближеного розв’язання початкових задач, для реалізації якого використовуються різницеві схеми та метод апроксимації сіткових функцій. Для автоматизації моделювання систем із запізненням розроблено прикладний додаток, який застосований для числового аналізу динамічних моделей із запізненням. Проведені числові експерименти для модельних тестових прикладів.

**Ключові слова** – диференціальні рівняння із запізненням, початкова задача, різницева схема, числове моделювання систем із запізненням.

## I. ВСТУП

У багатьох реальних прикладних процесах в біології, екології, медицині та інших технологічних процесах відбуваються часові затримки (запізнення). Вони пов’язані із тривалістю певних прихованих процесів (інкубаційні періоди) в медицині, використання різноманітних датчиків для вимірювання та передачі сигналів в техніці тощо. Введення ефекту запізнення в диференціальні рівняння, що описують такі процеси є необхідним для побудови адекватних математичних моделей у вигляді систем диференціально-різницевих та диференціально-функціональних рівнянь [1-2].

Численні застосування систем із запізненням призвели до активного зростання досліджень у різних напрямках теорії диференціально-функціональних рівнянь і появи нових цікавих теоретичних проблем, які потребують вирішення.

Знайти точний розв’язок диференціально-різницевих рівнянь вдається тільки у найпростіших випадках, тому методи побудови наближених розв’язків таких рівнянь мають важливе значення. Числові методи розв’язування початкових задач для диференціально-різницевих рівнянь розвивалися в працях [3,4]. При цьому в основному наближені методи розв’язання звичайних диференціальних рівнянь адаптуються на різні класи диференціально-

функціональних та диференціально-різницевих рівнянь.

У даній роботі розглядається досліджена в роботі [5] сім’я  $\theta$  різницевих схем, які є узагальненням різницевих схем Ейлера для інтегрування диференціальних рівнянь із запізненням та наведено алгоритм автоматизації методу кроків для початкових задач із запізненням.

## II. РІЗНИЦЕВІ СХЕМИ ДЛЯ ПОЧАТКОВИХ ЗАДАЧ ІЗ ЗАПІЗНЕННЯМ

### A. Сім’я $\theta$ різницевих схем

Будемо розглядати початкову задачу для диференціально - різницевого рівняння запізнюючого типу

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), x(t-\tau)), \quad (1)$$

$$x(t) = \varphi(t), t \in E_{t_0}. \quad (2)$$

де  $t \in \mathbb{R}$ ,  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $\tau > 0$ ,  $E_{t_0} = [t_0, t_0 - \tau]$  – початкова множина. Введемо рівномірну сітку

$$\omega = \{t_n = nh, n = -m, -m-1, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, k, k = \frac{T}{h}, m = \frac{\tau}{h}\}.$$

Будемо позначати через  $y_n$  наближене значення точного розв’язку  $x(t_n)$  в точці  $t = t_n$ . У роботі [5] одержано сім’ю  $\theta$  різницевих схем для задачі (1)-(2)

$$y_{n+1} = y_n + h((1-\theta)f(t_n, y_n, v_n) + \theta f(t_{n+1}, y_{n+1}, v_{n+1})).$$

Якщо  $\theta = 0$ , тоді одержуємо узагальнення явної різницевої схеми Ейлера.

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_n, y_n, v_n).$$

У випадку  $\theta = 1$  дістаємо узагальнення неявної різницевої схеми Ейлера

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_{n+1}, y_{n+1}, v_{n+1}),$$

а при  $\theta = 1/2$  маємо узагальнення різницевої схеми трапеції (неявна різницева схема Адамса другого порядку) для інтегрування диференціальних рівнянь із запізненням.



**Зауваження 1.** Якщо запізнення  $\tau$  та крок  $h$  не є раціонально залежними, то апроксимація  $x(t-\tau)$  в точці  $t=t_n$  здійснюється за правилом

$$x(t_n - \tau) \approx v_n = \begin{cases} \varphi(t_n - \tau), & \text{якщо } t_n - \tau < 0, \\ v_n^i, & \text{якщо } t_n - \tau \geq 0. \end{cases}$$

Значення  $v_n^i$  обчислюється за таким алгоритмом:

- 1) знаходимо  $i$  такий, що  $t_i \leq t_n - \tau < t_{i+1}$ ;
- 2) значення  $v_n^i$  знаходимо використовуючи лінійну інтерполяцію за точками  $(t_i, x_i)$ ,  $(t_{i+1}, x_{i+1})$ :

$$v_n^i = \frac{t_n - \tau - t_i}{h} y_{i+1} + \frac{t_{i+1} - t_n + \tau}{h} y_i.$$

### В. Автоматизація методу кроків

Метод послідовного інтегрування (метод кроків) полягає в тому, що на початку знаходимо розв'язок початкової задачі (1)-(2) при  $t_0 \leq t \leq t_0 + \tau$ , далі при  $t_0 + \tau \leq t \leq t_0 + 2\tau$ , і т. д. [6].

На першому відрізку  $t \in [t_0, t_0 + \tau]$  маємо задачу Коші:

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), z(t)), \quad (4)$$

$$z(t) = x(t-\tau), \quad x(s) = \varphi(s), \quad s \in [t_0 - \tau, t_0]. \quad (5)$$

Наближений розв'язок задачі (4)-(5) можна знайти за допомогою деякої різницевої схеми, оскільки  $z(t)$  відома функція, як множину точок

$$x_i = x(t_i), \quad t_i = t_0 + ih, \quad i=0, \dots, n, \quad h = \tau/n. \quad (6)$$

На наступному відрізку  $[t_0 + \tau, t_0 + 2\tau]$  розглянемо задачу Коші:

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), z_1(t)),$$

$$z_1(t) = x(t-\tau), \quad x(s) = \varphi_1(s), \quad s \in [t_0, t_0 + \tau].$$

де  $\varphi_1(s)$  деяка апроксимація  $x(t-\tau)$  за знайденими значеннями (6) на попередньому кроці. Продовжуючи цей процес ми побудуємо різницеву апроксимацію для початкових задач із запізненням, об'єднуючи деякий метод інтегрування задач Коші для звичайних диференціальних рівнянь та алгоритм апроксимації сіткових функцій.

### III. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ІЗ ЗАПІЗНЕННЯМ

Для автоматизації моделювання систем із запізненням за допомогою наведених в роботі числових алгоритмів розроблено прикладне програмне забезпечення. Для його розробки використано мову програмування Python та фреймворк Python Flask Framework. Розроблений додаток представляє собою набір структурованих сторінок для розв'язання диференціально-

різницевих рівнянь та побудови графіків знайдених розв'язків. Для керування додатком розроблено інтерактивне меню, що забезпечує можливість вибору задачі для розв'язання. Передбачено можливість користувачу введення не тільки числових параметрів, а також функцій з дотриманням синтаксису Python, які будуть використовуватись як повноцінна частина коду.

Досліджено SIR модель із двома запізненнями, що описує поширення захворювання Covid-19, де  $S(t)$  – кількість сприйнятливих осіб, які ще не інфіковані хворобою,  $I(t)$  – кількість інфекційних осіб,  $R(t)$  – кількість осіб, які одужали та мають імунітет,  $\tau_1 > 0$  інкубаційний період вірусу,  $\tau_2 > 0$  період відновлення

$$\frac{dS}{dt} = -\beta S(t - \tau_1) I(t - \tau_1),$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta S(t - \tau_1) I(t - \tau_1) - \gamma I(t - \tau_2) - \alpha I(t),$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I(t - \tau_2).$$

Ефективність моделі перевірялася в роботі [7] шляхом порівняння її прогнозів з реальними даними, зібраними у липні 2020 року в Німеччині.

За допомогою розробленого додатку знайдено наближений розв'язок цієї моделі з початковими параметрами  $\beta=0.17$ ,  $\gamma=0.03$ ,  $\alpha=0.01$ ,  $\tau_1=3$ ,  $\tau_2=9$  та початковими функціями  $\varphi(x)=1$ ,  $\psi(x)=0.1$ ,  $\zeta(x)=0$ , який достатньо добре співпадає із результатами одержаними у роботі [7].

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Arino, J. and van den Driessche. Time delays in epidemic models: modeling and numerical considerations. – Delay Differential Equations and Applications, 2006. – P. 539–578.
- [2] Schiesser W.E. Time Delay ODE/PDE Models. Applications in Biomedical Science and Engineering. – Boca Rona, 2019. – 250 p.
- [3] Bellen A., Zenaro M. Numerical methods for delay differential equations. – New York: Oxford University Press, 2003. – 395 p.
- [4] Kuang J., Cong Y. Stability of Numerical Methods for Delay Differential Equations. – Elsevier Science, 2007. – 295 p.
- [5] Луник Т.В., Черевко І.М. Моделювання математичних моделей біології та імунології із запізненням. Буковинський математичний журнал. 2021. – Т. 8, № 2. С. 92–98.
- [6] Bauer, R.J.; Mo, G.; Krzyzanski, W. Solving delay differential equations in S-ADAPT by method of steps. *Comput. Methods Programs Biomed.* 2013. – V. 111. – P. 715–734.
- [7] Ebraheem H., Alkhateeb N., Badran H., Sultan E. Delayed Dynamics of SIR Model for COVID-19 // *Open Journal of Modelling and Simulation.* – 2021.– V. 9.– P. 146-158.



***СЕКЦІЯ 7  
РОБОТОТЕХНІКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА  
КЕРУВАННЯ***

# *Environmental Warfare – Modern Global Challenge*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.103>

Ramil Akhundov

National Security and Military Sciences, Military Scientific  
Research Institute of the National Defence University of the Republic of Azerbaijan  
mr.axundov1@gmail.com

**Abstract** — The article is devoted to the study of ecological wars as one of the main modern global environmental challenges to humanity. Interest in the problem of ecological warfare is due to the significant influence of natural factors on the economic component of states. Analysing ecological warfare through the characteristic features of modern global environmental challenges to humanity, theoretical conclusions are confirmed by practical examples from the world history of South Vietnam, Yugoslavia, Kuwait, Azerbaijan and Ukraine. The author analyses the concept of ‘ecological warfare’ and distinguishes it from other similar concepts. The author’s concept of ecological warfare, which should be understood as a set of actions, measures taken by adversaries in the course of a protracted in time with a certain intensity of armed conflict, the parties of which as the main (or predominant) means use the destruction (significant destruction) of the environment, the consequence of which can become an ecological disaster. Of particular interest is the conclusion that the consequence of environmental warfare is an ecological catastrophe that can jeopardise the existence of humankind.

**Keywords** — environmental warfare; modern global environmental challenges to humanity; environmental crimes; armed conflict.

The term "war" is practically not used in the legal literature; the term "armed conflict" is used. The term war is used to refer to the declaration of a state of war. Recognition of a state of war is an act by which either the government of the country on whose territory an armed conflict takes place recognises that the latter is a war subject to the full range of laws and customs of war, or the government of a third state concludes that this armed conflict is a war in respect of which it intends to take a neutral position (David, 2000). Almost all major wars have had eco- logical consequences (Akhundov, 2024). An effective way to undermine the enemy's economic potential and reduce its combat power was the impact on the biosphere elements or technogenic objects in the course of military operations. Therefore, environmental consequences are not a distinctive feature of environmental warfare (Akhundov, 2024). In order to qualify actions as environmental warfare, it is necessary to analyse the causes, reasons, means, methods, consequences, and consequences of the war.

The programme has been designed to promote the development of a sustainable use of natural resources, natural objects, and the environment as a whole.

Traditionally, the literature identifies several close concepts of "ecological warfare":

purposeful technogenic impact by "non-military" means on certain parts of the biosphere and outer space, which inevitably leads to natural cataclysms, weather and climate changes, ozone holes, as well as destruction of ecosystems, violation of physical and mental health of the population (Krylova, 2001);

deliberate impact on the natural environment in order to create unfavourable conditions for human life - destruction of the habitat of enemy troops, equipment and weapons, undermining the economic potential, psychological, political pressure, etc.;

Damage to the enemy by affecting its environment: pollution or contamination of air, water, soil, destruction of flora and fauna (Akhundov, 2024).

In our opinion, these definitions do not adequately reflect the essence of environmental warfare. For example, a terrorist act may also fall under the content of both definitions. But the commission of a terrorist act of a single character cannot be considered a war.

In our opinion, environmental warfare is a set of actions, measures taken by adversaries in the course of a prolonged in time, with a certain intensity of armed conflict, the parties of which as the main (or predominant) means use the destruction (significant destruction) of the environment, the consequence of which may be an environmental disaster.

Scientists are interested in the problem of ecological warfare because of the significant influence of natural factors on the economic power of states. Ecology has a direct, though not determinant, impact on the development of forms and methods of armed struggle and on the nature of warfare. ‘Active influences on natural processes make it possible to create the simplest and most cost-effective destructive means, which would produce results that would leave all other types of weapons of mass destruction far behind. In addition, natural conditions can be affected remotely, at a considerable distance from the place at which the ‘strike’ is directed, which creates favourable opportunities for covert warfare.

Countries with well-developed technology for active environmental impacts for military purposes can pursue a policy of ‘environmental blackmail’ against States that do not develop such technology and do not establish means of control and counteraction. In the modern

world, there are already methods of active environmental impact for military purposes, which include artificial destruction of the ozone layer, dispersion and formation of clouds and fog, initiation of earthquakes, creation of tidal waves such as tsunamis, impact on tropical cyclones, use of atmospheric currents to transport radioactive and other substances, creation of disturbance zones in the ionosphere.

Each of these methods poses a danger not only to the parties to the armed conflict, but also to other states. For example, characterising such impacts on the natural environment, American scientists have found that a decrease in the average annual temperature in the USA by just one degree, accompanied by an increase in precipitation by 12.5 per cent, would lead to such an increase in the number of diseases among the population that the total economic losses could amount to more than \$100 billion a year. Similar changes will lead to a decrease in wheat yields in the main grain-producing countries (USA, Argentina, Australia, Canada, France) by 15-17%. For Russia these figures will amount to 20-37 % due to its own physiographic and climatic conditions.

There are a number of reasons for classifying environmental warfare as a temporary global environmental challenge to humanity:

the environmental character of the act. Analysing military practice, it is possible to identify a distinctive trend - the environment is considered a direct object of military action, which changes the goals and nature of modern warfare (armed conflicts). The difference between environmental warfare and conventional warfare is the implementation of specially designed programmes (operations) aimed at the total destruction of the natural environment or local destruction of the ecological system on the enemy's territory to facilitate the fulfilment of strategic or operational-tactical tasks to the maximum extent possible. For example, the military-strategic Operation Ranch Hand during the Indochina War is a clear example, where tropical ecological systems, rather than military installations or enemy forces, were targeted. The goal of the operation was to provoke a large-scale man-made ecological catastrophe, achieved by using conventional types of military equipment and specially designed warfare designed exclusively for the destruction of the natural environment;

global manifestation. The consequences of environmental warfare are extremely severe and can affect ecological interests. The United States has a history of targeting the interests of several states. For example, in South Vietnam, during the Second Indochina War (1962-1975), American troops carried out targeted and large-scale extermination of fauna and flora for several years. In the history of military affairs, this war was the first war in which one of the warring parties attempted to completely destroy the environment. According to the data provided by V.V. Dovgusha and M.N. Tikhonov, 50 per cent of the territory of South Vietnam and some areas of Laos and Cambodia were sprayed with toxic chemicals, 43 per cent of crops and 70 per cent of coconut palm groves were destroyed, 44 per cent of the forest area of South

Vietnam and 13,000 km<sup>2</sup> of rice fields were damaged, 2 million inhabitants were killed and maimed, 60,000 American soldiers were poisoned.

Analysing the results of the impact on the environment of Indochina during Operation Ranch Hand, it can be stated that the greatest damage was caused to the ecological systems of the peninsula (agricultural plantations, mango forests, tropical forests (jungle), accelerated degradation of soil ecological systems, laterisation and soil erosion. The fauna of South Vietnam and the whole of Indochina changed. Later, the negative impact of FR on humans was recorded.

According to A.G. Busygin, the ecological war in Kuwait assumed even greater proportions. "In the short days of this war, NATO forces dropped 84,000 to 88,000 bombs on Iraq, and their weight exceeded the tonnage of Allied bombs during the Second World War. Iraq responded by blowing up Kuwait's oil wells and burning oil (destroying four times Kuwait's annual oil production). According to satellite observations, the 100-metre-high heatwaves spewed 50,000 tonnes of sulphur dioxide and 180,000 tonnes of soot and carbon dioxide into the atmosphere every day. The consequences of this environmental war are extremely severe. Seven million barrels of oil flowed into the Persian Gulf, into the drinking groundwater, and soot and carcinogens into all life on the surface. About 30,000 soldiers in the half-million-strong US army were affected by an unknown disease, and their families now have children with pathological deformities and Down syndromes". NATO's Operation Desert Storm caused catastrophic consequences in the form of meteorological cataclysms as far as the North Caucasus and Crimea;

The consequence of ecological warfare is an ecological catastrophe, which threatens human existence. Usually an ecological catastrophe is understood as a natural or human-induced disaster that has a long-term (often irreversible) negative effect on the environment and human beings, spreading over a large enough territory.

Specially generated environmental disasters, which are of particular danger, usually occur as a result of ecological wars (or wars with ecological consequences), terrorist acts with ecological consequences (ecological terrorism). Even the limited use of special means or military equipment against environmentally dangerous technical objects or components of the biosphere can lead to irreversible destruction of the environment over a wide area.

During the conflict with Yugoslavia in 1999, a humanitarian catastrophe unprecedented in modern Europe was triggered, which turned into an environmental disaster. The attack on Yugoslavia used many weapons that are prohibited by international conventions (cluster bombs, depleted uranium munitions, etc.). These weapons were a threat not only to military infrastructure, but also to the lives of citizens and the environment. About 10 tonnes of depleted uranium were dropped on Yugoslavia during the bombing campaign, destroying the natural biogeosystems of Yugoslavia;

is always an intentional act. The means of waging environmental warfare may include: physical extermination of fauna and flora, damage to the environment by various agents of biological, chemical or physical nature, provoking a man-made disaster by means of the development of new technologies. The assessment of warfare is determined by the possibility and availability of means of defeat and tactics of their use. The assessment of ways of warfare is determined by the possibilities and availability of means of defeat and tactics of their application. Environmental warfare uses not only means specially created for the destruction of the environment, but also weapon systems with a different original purpose (weapons of mass destruction, conventional weapons, non-lethal weapons, etc.). The warfare means used are of a complex nature, which increases the effectiveness of their destructive effect on the environment.

For example, during the Second Indochina War, the "carpet bombing" method, the most environmentally destructive method, was used to completely destroy vegetation and animal life on a 65-hectare "carpet" of land by dropping 93 bombs from one aircraft. Thus, 26 per cent of the territory of South Vietnam was destroyed. Since mid-1967, so-called vacuum bombs have been used to clear jungle landing sites for helicopters and aeroplanes. The development of a programme to modify weather conditions in combat areas is also known, the content of which consisted in the creation of artificial showers, which were caused by the use of special chemical reagents in clouds, breaking the mechanism of filtration. There were also attempts to stimulate typhoons and floods in the coastal zone of Vietnam.

During the previously mentioned Operation Ranch Hand ("RH"), mangrove forests were severely damaged. More than 80 per cent of the mangrove forest area was treated with phytotoxic formulations.

This effect was achieved due to the increased sensitivity of mangroves to mountainous preparations (phenoxyherbicides, which are part of most FRs). The subsequent decay of dead trees and erosion of the coastal soil aggravated the ecological situation.

The sharp decline in species diversity and numbers of animals and birds was caused by the use of chemical and explosive weapons against OPS. During Operation RH, the species composition of the affected rainforest fauna was almost completely changed: traditional populations of small mammals were replaced by rodents, while large mammals were virtually eliminated.

According to official data, 30 per cent of South Vietnam has been treated with phytotoxic formulations, with mangrove forests treated once or twice and tropical forests, which are important for climate and ecological system regulation and determine biocapacity, treated up to four times, killing 60 to 100 per cent of the trees. Huge areas of jungle (about 1.6 million hectares) were burned with napalm charges, which is known as the "moonscape" due to the complete absence of shrub vegetation and burnt earth.

As a result of the damage to the most important producers, it became impossible to restore the ecological system. Subsequently, the affected areas became overgrown with low-value bamboo forests or elephant grass, preventing the restoration of the forest ecosystem. The craters created by the intense bombardment of the jungle filled with water and became breeding grounds for malaria mosquitoes and tropical malaria. The use of the Grad system (BM-21 122-mm division 122-mm field multiple rocket launcher system) to shell Tskhinvali resulted in the release of hazardous chemicals - raw materials and intermediates of the weapons used, which led to their concentration in the atmosphere exceeding levels comparable to the use of chemical weapons. A salvo of 40 fragmentation-explosive shells provided for the defeat of openly located troops on an area of 1046 m<sup>2</sup>, and of unarmoured vehicles - on an area of 840 m<sup>2</sup>.

One of the striking examples of the impact of military conflicts on the ecosystem is the aggression of Armenia against Azerbaijan. The occupation of Nagorno-Karabakh has resulted in extensive ecological degradation, which can be described as "ecocide." This situation necessitates the assignment of criminal liability. Armenians perpetrated acts of environmental terrorism on these territories for nearly three decades. The complete eradication of the fauna and flora in the Karabakh region was carried out prior to its transfer to Azerbaijan. The forested regions encompassed a total of 247,352 hectares and are home to over 460 species of wild plants and shrubs. Seventy of these species are endemic, meaning they are not found in any other region of the world. A total of 968 hectares of trees, which are listed on the IUCN Red List, were also deforested and exported from the Kalbajar region. In addition, they torched residences and ignited trees before departing from the area. Water resources were utilized by Armenian officials as a means of exerting political influence. Armenia obstructs the flow of water sources and significantly contaminates them with hazardous substances. Consequently, the utilization of these water sources becomes unfeasible, rendering them unsuitable for both potable consumption and agricultural irrigation (Akhundov, 2024).

Another example of the impact of military conflicts can be given by the example of the conflict between Russia and Ukraine. The Russian incursions into Ukraine have caused extensive devastation to the steppe grasslands, which currently account for a mere 3% of the area in southern and eastern Ukraine. Approximately 20 steppe species, which are rare and endangered, are thought to have vanished as a result of the war. These plants are primarily found in the Black Sea peninsula of Crimea, which is considered the largest area of endemism in Ukraine. There are 44 plant species in this region that are exclusive to this area and cannot be found anywhere else on Earth. Furthermore, it is asserted that Ukraine's protected territories have endured significant damage as a result of the Russian military operations conducted in Ukraine. Lyudmila Denisova, the Ukrainian Parliament Commissioner for Human Rights, highlighted that approximately one-third of Ukraine's nature reserve fund is under risk of destruction. The Luhansk Nature Reserve, Black Sea

Biosphere Reserve, Askania-Nova Biosphere Reserve, National Nature Parks "Azov-Sivasky" and "Dzharilgatsky", arboretum "Trostyanets", and other designated areas have experienced significant levels of damage. According to Afanasyev (2023), the Kherson Hydrobiological Station has incurred significant damage. In eastern Ukraine, the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine (2017) documented the impact on 60 protected sites. The conflict had a significant impact on the biodiversity, leading to a decline in the number of uncommon animal and bird species (Akhundov, 2024).

Thus, environmental warfare is one of the major contemporary global environmental challenges to humanity.

#### REFERENCES

- [1] Akhundov R. G. Methods of conducting chemical exploration. – 2023.
- [2] Akhundov R. Ecocide in the Nagorno-Karabakh Conflict: An Analysis of Armenia's Environmental Impact on Azerbaijan // Current directions of development of information and communication technologies and control tools. Abstracts of the Fourteenth International Scientific and Technical Conference. – Kharkiv, Ukraine. – 2024. – T. 2. – C. 95-96.
- [3] Ахундов Р. Г. Влияние военной деятельности на окружающую среду // Санкт-Петербург. – 2024. – Т. 29. – № 1. – С. 51.
- [4] Akhundov R. The Environmental Consequences of Military Activity //20 години България в НАТО и НАТО в България. – Военна академия „Г. С Раковски“. – С. 410-422.
- [5] Akhundov R. Military conflicts and environmental safety // Current directions of development of information and communication technologies and control tools. Abstracts of the Fourteenth International Scientific and Technical Conference. – Kharkiv, Ukraine, – 25-26 April 2024, Vol 2, – p.89-90.
- [6] Axundov R., Abdullayev, R.S. Karbon əsaslı adsorbentlərin sintezi və tətbiqi // – Bakı: Milli təhlükəsizlik və hərbi elmlər, – 2023. №1(9), – s. 35-42.
- [7] Akhundov R. The environmental impact of military activities. - 2024.
- [8] Axundov, R.Q., Abiyev, Q.A., Nabizada, Z. Radiasiyanın aktiv kömürlərin mexaniki möhkəmliyinə təsiri // Tibb elmləri doktoru Əzəm Təyyar oğlu Ağayevin anadan olmasının 75 illiyinə həsr olunmuş elmi konfransın materialları, – Bakı: – 21 noyabr, – 2019, –s.14-17.
- [9] Akhundov R. Azərbaycan Ordusunda radiasiya, kimyəvi və bioloji mühafizənin inkişaf problemləri və onların həlli yolları. – 2023.
- [10] Akhundov R. Application of means of remote radiation reconnaissance // Modern trends in the development of information and communication technologies and management tools. Abstracts of the Thirteenth International Scientific and Technical Conference. – Kharkiv, Ukraine, – 26-27 April 2023, Vol 2, – p.8-9.
- [11] Axundov, R.Q. Azərbaycan Ordusunda radiasiya, kimyəvi və bioloji kəşfiyyatın xüsusiyyətləri // “4-cü sənaye inqilabı və iqtisadiyyatın rəqəmsallaşdırılması” mövzusunda beynəlxalq elmi konfransın materialları, – Bakı: Odlar Yurdu Universiteti, – 18-19 may, – 2023, – s.104-108.
- [12] Akhundov R. Azərbaycan Ordusunda radiasiya, kimyəvi və bioloji kəşfiyyatın xüsusiyyətləri. – 2023.
- [13] Axundov, R.Q. Radiasiya, kimyəvi və bioloji mühafizə sisteminin təkmilləşdirilmə istiqamətləri //“Müdafiə sənayesi üzrə ixtisaslı kadr hazırlığı: radioelektron, aerokosmik sistemlər və robotlar” mövzusunda II Respublika elmi-texniki konfransın materialları, – Bakı: AzTU, – 22-23 iyun, – 2023, – s.89-92.
- [14] Axundov, R.Q. Radiasiya, kimyəvi və bioloji mühafizə sisteminin texniki təminatının analizi // Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 100 illiyi və qələbənin üçüncü ildönümünə həsr olunmuş “Milli təhlükəsizlik və müasir hərbi sənəti” mövzusunda keçirilmiş respublika elmi-praktik konfransın materialları , – Bakı: MMU Hİİ, – 1-2 noyabr, – 2023, – s.470-472.
- [15] Akhundov R.G. Talibov A.M. Environmental safety as a component of national security // The latest technologies - for the protection of airspace. Abstracts of the 20th international scientific conference of the Kharkiv National University of the Air Force named after Ivan Kozhedub. – Kharkiv, Ukraine, – 02-03 May 2024, – p.25-27.
- [16] Akhundov R.G. Environmental safety as a component of national security. – 2024.



# *The Unmanned Robotic Complex For The Small Arms Fire Evaluation*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.104>

Azad Bayramov  
Institute of Control Systems  
Baku, Azerbaijan  
e-mail: azad.bayramov@yaho.com

Samir Suleymanov  
Republican Seismic Survey Center  
Baku, Azerbaijan  
e-mail: ofis.setm@gmail.com

Fatali Abdullaev  
Republican Seismic Survey Center  
Baku, Azerbaijan  
e-mail: fataliabdullayev66@gmail.com

**Abstract** — The article presents the developed unmanned robotic complex for evaluation of small arms fire. The complex is designed for effective training of soldiers and officers in shooting at close and long distances (20 ÷ 1500 m.). The operating principle of the system is briefly described and technical characteristics are given. The complex is equipped with a hydro meteorological station for correcting shooting in accordance with the ballistic characteristics of the projectile during shooting. The shaped target is made of polymer carbon plastic material and it has a long service life. The software for unmanned control of the robotic complex has been developed. It is shown that the proposed unmanned robotic system has significant advantages over foreign analogues.

**Keywords** — unmanned; robotic; evaluation; small arms; target; software

## I. INTRODUCTION

In recent years, the development of automated robotic systems for effective training on the accuracy of small arms fire has become more and more important [1,2]. There are products of a number of leading companies in the world engaged in the development and sale of such systems. Note that the products (systems) shown below are not simulators.

Smart shooting target allows to determine the accuracy and precision of fire quickly and with high reliability. Usually, a smart target consists of a target with acoustic sensors and a computer. The operation of the complex is based on the principle of acoustic accommodation. When the bullet flies at a supersonic speed, the shock wave affecting the target plane and acoustic sensors causes electrical signals to be generated in them, which allows to determine the point of impact on the target online and display this information on a computer monitor. After the fire is finished, its accuracy and grouping of shots are calculated automatically. All data is displayed in digital and graphical form on the PC monitor. The main disadvantages of the Smart target are as follows: 1) only one target can be controlled at a time, 2) it can be used only in closed places,

thereby limiting the control range, 3) the use of a shock sound wave reduces the accuracy of determining the coordinates of the bullet hitting the target.

The PIAP MOBI TARGET shooting training system, created by Action Target Inc. in the USA [3], is well known. PIAP MOBI TARGET is a system for active shooting training. It is designed to train and improve the skills of employees of state security and defense services, as well as armed guards and sports shooters. PIAP MOBI TARGET consists of a mobile platform, an operator control panel (with a training interface) and a relay station. The advantages of the system are its mobility, ability to act quickly and complete independence from the existing communications infrastructure.

PIAP MOBI TARGET can operate in close proximity to each other and near local obstacles on the shooting range. The robotic target moves up to 1200 m. This allows for sniper training, where shooters can fire at long distances. PIAP MOBI TARGET was designed with modularity in mind, allowing it to be configured according to individual customer requirements. Depending on the configuration, the mobile platforms can be equipped with paper target holders (basic version) or a 3D dummy lift equipped with a hit detection and parameterization system (advanced version). The weight of the PIAP MOBI TARGET system is 380 kg, the maximum radio control radius is 1200 m. The main disadvantages of this system are its large weight and insufficient efficiency in calculating the bullet hit points on the target.

Another product, Mantisx System, was developed by American specialists [4]. This system is designed to improve shooting skills from small arms (machine gun, pistol). The Mantisx System kit consists of a firearm, a special attachment to the weapon, a target, and a smartphone for reading and processing information about the bullet hitting the target. A special attachment is used to connect the smartphone to the target via

Bluetooth. The main disadvantage of the Mantisx system is its use at short distances, only 25 m.

This paper presents a developed and manufactured unmanned robotic complex for controlling shooting from small arms (machine gun, sniper rifle, and pistol). This complex can be controlled without an operator, automatically determining the coordinates of the bullets hitting the target and count the points of bullets hitting the target. Software for unmanned control of the robotic complex has been developed. The system is designed for effective training of soldiers and officers in shooting at close and long distances (20÷1500 m). The operating principle of the complex is briefly described; technical characteristics are given. It is shown that the proposed unmanned robotic complex has significant advantages over foreign analogues.

## II. ROBOTIC FIRING SYSTEM

The unmanned robotic complex for evaluation of small arms fire is designed to teach skillful and effective handling of firearms. The shooting control system performs shooting and automatic assessment of the shooting task at various types of targets using

automated software, technical equipment and a rotating camera. PTZ camera - Pan-tilt-zoom-camera - is a camera that supports remote control of direction and scaling. PTZ control is called robotic control system. It is equipped with pan, tilt and zoom control system. It is directed to specified objects under the control of internal controller.

This system is equipped with a hydro meteorological station for correcting shooting in accordance with the ballistic characteristics of the projectile during shooting. Fig. 1 shows the platform of the fire evaluation system together with the raised target. The figured target is made of carbon-filled plastic. The advantage of this material is that usually a paper target is glued to the chipboard target (chipboard is a wood material made by pressing wood chips), when it is hit, the turret breaks through it, and after some time a new target is required (the paper target is replaced for each shooter). However, the target made of polymer carbon fiber has a long service life, because this target is processed from time to time using a special technology.

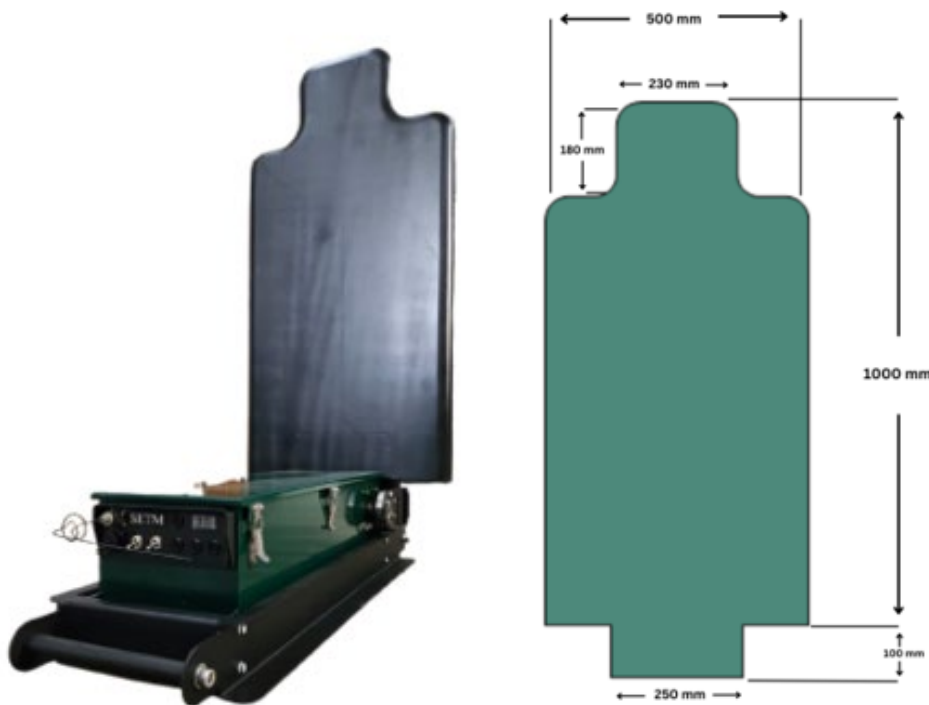


Figure 1. The platform of the fire evaluation system together with the raised target.

Advantages of the design capabilities of the unmanned robotic complex:

- a durable metal body that ensures long-term safe operation of the unmanned robotic complex, meets the conditions of transportation and manual transportation in landfill conditions;
- reliable, convenient and relatively quick fastening of figures with a special clamp;
- the presence of additional elements that ensure reliable fastening of the device to the ground and protection of the body from direct bullets;

- external battery in a separate protective case, allowing quick removal for charging, replacement or storage without the use of special tools;
- external power connector for uninterruptible power supply from a stationary network (without battery);
- dust and moisture-proof projector for visible or infrared target illumination at night;
- highly accurate and sensitive adjustable inertial impact sensor for shot evaluation.

Table 1 shows the tactical and technical parameters of the unmanned robotic shooting assessment system.

TABLE I. TACTICAL AND TECHNICAL PARAMETERS.

N	Characteristics	Values
1.	Climatic conditions: - environment temperature - relative humidity, at ambient temperature of 10°C - wind speed, should not be more	- 20°C ÷ + 40°C  95% 15 m/sec
2.	Mechanical characteristics: - mass of the assembled product - overall dimensions - maximum power moment on the shaft - pitch or roll angle - lifting and lowering speed.	57 kg 1000x310x220mm  110 Nm 90±3° < 3 sec
3.	Energy characteristics: - nominal supply voltage - maximum power consumption - battery capacity - number of complete ascent-descent cycles (with a fully charged battery, at the permitted operating temperature)	10,8 V ÷ 13,8 V 40 W 50 Ah  6000 times
4.	Lighting system characteristics: - target figure lighting mode (infrared/white): - lighting frequency	continuously or at a given frequency; 1 ÷ 5 Hz
5.	Radio channel characteristics: - number of targets used at the same time - control distance - radio frequency - radio wave power (depending on distance)	10 units 20 ÷ 1500 m 140÷170 MHz, 400÷470 MHz  0,1 ÷ 1 W

The advantages of the shot control system are:

- possibility of use in various terrain;
- automatic evaluation during shooting;
- possibility of night shooting;
- the number of targets connected to the control panel is 2-10 units, connection time is 5 minutes;
- the ability to use a battery regardless of the electrical network;
- a protocol for controlling target lifts (fixed, non-fixed);
- control via RS-485 or radio channel: RS-485 is a two-wire differential transmission standard that provides high-speed data transmission over long distances; the 485 interface typically uses DB9 or DB25 connectors, as well as special connectors;
- it is possible to increase the control distance (upon request);
- simultaneous shooting in pairs, squads, groups;
- constant control of the shooting area by the camera.

Figure 2 shows a simplified block diagram of the unmanned robotic complex control software for evaluation shooting from small arms.

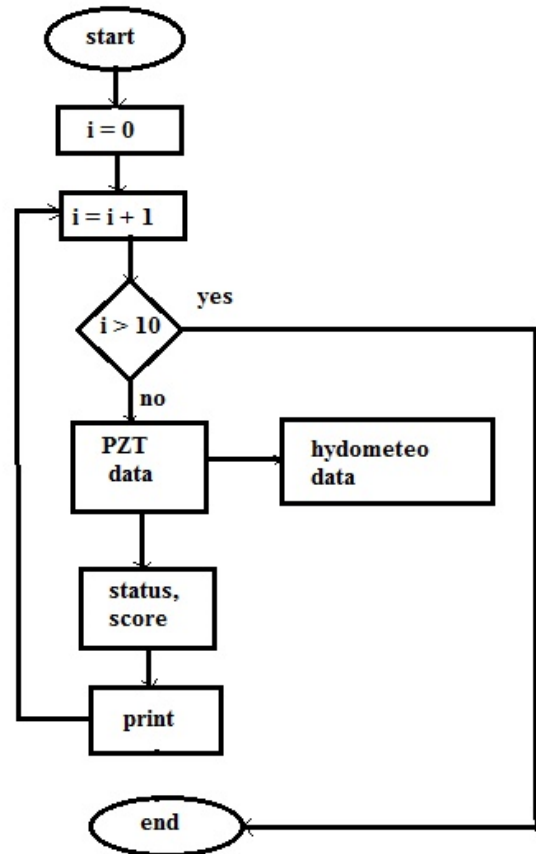


Figure 2. A software of the unmanned robotic complex for controlling shooting from small arms.

The control begins with the Start command, when the complex's electrical power is turned on and all its functional modes are checked. Then all data in the control memory of the complex is reset to zero. At the next step, the 1st ( $i = 1$ ) target is requested and it is checked whether the number of this target is greater than 10 or not ( $i > 10$ ). If the target number is greater than 10, then the evaluation process ends (go to the End block). If the target number is less than 10 ( $i < 10$ ), then all PZT block data is requested (target number, type of target: standing or chest figure), coordinates of bullet impact points on the target, distance to the target) and hydro meteorological data.

In the next control block, the status (state of the target: it is raised or lowered) of the shooting results is determined, and the shooting is evaluated (scoring). After this, the shooting results are recorded in the memory of the control unit and can be printed at the request of the customer.

After this, the analysis moves on to the next target and everything is repeated from the beginning. The maximum number of targets that the control system can interrogate is 10.

In addition, from the comparison with foreign analogues it is clear that the system we offer has significant advantages.

### CONCLUSION

Thus, the paper presents an unmanned robotic complex designed and manufactured for the assessment of fire from small arms (machine gun, sniper rifle, pistol). This complex can be controlled without an operator, the coordinates of the bullets hitting the target can be determined automatically, thanks to which it is possible to assess the accuracy of the shot and calculate the shooter's score. The software for unmanned control of the robotic complex has been developed. The system is designed for effective training of soldiers and officers in shooting at close and long distances (20 ÷ 1500 m). The target is made of polymer carbon fiber and has a long service life. The proposed unmanned robotic complex has significant advantages over foreign analogues.

### REFERENCES

- [1] A. Bayramov, S. Suleymanov, F. Abdullaev, The Robotic Control System of UAV Based on Artificial Intelligence Technologies. In: Ronzhin, A., Savage, J., Meshcheryakov, R. (eds). Interactive Collaborative Robotics. ICR 2024. Lecture Notes in Computer Science, 2024, vol. 14898. pp. 357-367. Springer, Cham.
- [2] A. Bayramov, S. Suleymanov, Remote Control Robotic System for the Perimeter Security. In: Ronzhin, A., Sadigov, A., Meshcheryakov, R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2023. Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2023, vol. 14214. Springer, Cham. Chapter 16. pp. 175–184.
- [3] PIAP mobi target robotic shooting training system. <https://www.antiterrorism.eu/portfolio-posts/robotic-shooting-training-system/> 22.August.2024.
- [4] Mantis firearms training system. <https://mantisx.com/pages/how-it-works-1> 06.September.2024.

# *Analysis of Methods for Controlling Ball Drum Mills at Hard Materials Grinding*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.105>

Roman Fedoryshyn

Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
roman.m.fedoryshyn@lpnu.ua

Vasyl Lymych

Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
vasyl.v.lymych@lpnu.ua

**Abstract** — The technological process of grinding hard materials with application of ball drum mills has been analyzed. The advantages and disadvantages of ball drum mills application for grinding hard materials have been determined. The analysis of methods for ball drum mills control has been conducted based on the vibration acceleration signal from the mill's input support, the differential pressure across the mill drum, the temperature of the air mixture at the mill's outlet and the active power signal of the mill drive.

**Keywords** — ball drum mill; automatic control; protection; algorithm; productivity

## I. INTRODUCTION

The technological processes of material grinding with application of ball drum mills (BDM) play a key role in many industries [1]. Ball drum mills are used for grinding clinker at cement plants, clay at ceramic plants, ore at mining enterprises and other. Grinding processes are of particular importance for thermal power plants that operate on solid fuels, i.e. coal.

The significant energy consumption associated with the grinding of hard materials drives the development of new approaches to the automated control of ball drum mills. The improvement of automatic control algorithms is also aimed at enhancing the reliability of BDM operation and preventing emergency situations such as mill blockage (overflow), air mixture explosions, blockages and failures in dust pipelines [2].

## II. TECHNOLOGICAL PROCESS

Grinding is the process during which the size of material particles is reduced by means of the mechanical action. It is widely used in various industries for different purposes. As a result of grinding, the surface area of the processed materials increases, which significantly accelerates processes like dissolution, chemical interaction and the release of biologically active substances from the material being ground. Depending on the size of the initial material chunks and the final product, grinding can be divided into crushing (coarse, medium, and fine) and milling (fine and ultra-fine). During medium and fine crushing, brittle substances are ground in rollers, crushers and mills.

A ball drum mill consists of a drum partially filled with grinding bodies, such as balls, rods or sometimes

pebbles. During the rotation of the drum, the grinding bodies are lifted by the centrifugal force and by the mutual friction between themselves and the drum lining, which helps them rise to a certain height, fall and grind the material inside the mill. Steel balls are often used as grinding bodies.

The ball drum mill has many advantages, making it one of the leading machines for grinding:

- it is used for grinding both soft and hard materials;
- it can operate for a long time without repair, ensuring high operational stability;
- the ability to adjust the fineness of grinding within the limits required for a specific task;
- the ability to work with heated air provides high drying efficiency, even when working with high-moisture materials;
- metal impurities entering the mill with the material do not damage the mill itself.

However, the ball drum mill also has some disadvantages:

- the construction of the mill requires significant material costs and occupies a large space;
- if the mill operates at less than full capacity, its efficiency decreases significantly.

Despite the mentioned disadvantages, the ball drum mill is widely used for grinding hard materials.

The technological diagram of the process for grinding the hard materials includes the following equipment: raw material hopper, raw material feeder (belt conveyor), ball drum mill, separator, cyclone (dust removal from the air), dust hopper and mill fan. The raw material flows from the raw material hopper to the feeder, which transports it to the rotating ball drum mill. Additionally, the inlet of the BDM receives the drying agent, i.e. a mixture of flue gases and ambient air. After grinding, the material and the drying agent form the air-mixture that exits the BDM and enters the separator, where particles are classified according to their size. Larger particles that were formed during grinding are returned to the BDM for re-grinding (return from the separator). The air-mixture after the

separator enters the cyclone, where the drying agent and dust are separated. The dust is then directed to the dust hopper.

### III. AUTOMATIC CONTROL METHODS

During the setup of automatic control systems for the BDM, mill calibration is usually performed. This involves recording the static characteristics of the mill's load dependence on the raw material feeder productivity [3]. The mill's load is also an indicator of its grinding productivity. When the productivity of the raw material feeder increases, the grinding productivity of the mill increases too. But after reaching some maximum value, the grinding productivity of the mill may decrease. This may lead to a blockage of the mill. Such a situation may occur due to changes in the quality characteristics of the raw material, such as moisture content and granulometric composition.

After calibrating the mill, its control is carried out according to the obtained static characteristics. Blockage protection is provided by measuring the vibration of the bearing supports at the mill's input and output, as well as the differential pressure across the mill. If the vibration levels of the bearing supports fall below the allowable values (each bearing has its own allowable limit), the protection system should activate stopping the material feed to the mill and preventing a blockage. The mill's blockage protection also involves monitoring the differential pressure across the drum. If the differential pressure exceeds the allowable limits, the raw material feed to the mill must be immediately stopped.

During the start-up of the mill from the off mode, the coal supply is carried out gradually to avoid potential blockage. In case of the pulse feed mode, when the productivity of the coal feeder is twice or three times higher than the working productivity of the mill, the duration of pulses gradually increases, and in case of the continuous feeding, the productivity of the coal feeder increases gradually.

When the raw material feeding is suddenly stopped, there is a risk of blocking and failure of the dust pipelines. This happens because the material becomes evenly distributed along the mill drum, leading to a significant increase of the coarse dust fraction amount in the mill and the air mixture. This increase in the coarse dust fraction leads to an increase in the differential pressure across the mill to a certain maximum level, after which the differential pressure may decrease. If the differential pressure increases to a critical value, blockage and failure of the dust pipelines may occur. Therefore, during operation of BDM, it is important to maintain conditions when the differential pressure does not reach the critical value. The mill is stopped by gradually reducing the duration of the pulses (in case of the pulse feeding of the raw material) or by gradually decreasing the feeder productivity (in case of the continuous feeding of the raw material).

In addition to the threat of blocking and failure of the dust pipelines, another emergency situation may arise in a coal mill, i.e. explosion of the air mixture at the outlet. This explosion can be triggered by the combustible components contained in the coal dust, if

the temperature of the air mixture exceeds the permissible limits. To prevent such explosions, a protection loop should be provided in the automatic control system. This protection loop should change the temperature of the drying agent by increasing the supply of air from the environment. However, this can create a new hazard because of the increased amount of oxygen in the drying agent, which can increase the risk of explosion. Therefore, the ratio of ambient air flow rate and flue gases flow rate should be maintained within the strictly defined limits.

Today, there are several control algorithms for BDM [1] – [4]: pulse raw material feeding with fixed duration of pulses and pauses between them; continuous raw material feeding with fixed productivity of the feeder; control based on the measured vibration signal of the front bearing support with pulsed or continuous feeding of the raw material; control based on the measured differential pressure signal across the mill with pulsed or continuous feeding of the raw material; control based on the measured air mixture temperature signal at the mill outlet with pulse or continuous feeding of the raw material; control based on the measured active power signal of BDM drive with pulsed or continuous feeding of the raw material.

The condition of the dust pipelines can be a limitation for increasing the grinding productivity of the BDM. If the dust pipelines are not airtight, this leads to reduction of the ventilation productivity and overall efficiency of the mill. Another limitation is an insufficient or too high level of the ball charge in the mill. This level depends on the characteristics of the coal and the type of the mill.

### IV. CONCLUSION

This work presents an analysis of the technological process of grinding hard materials with application of the ball drum mills. The advantages and disadvantages of using ball drum mills for grinding hard materials have been identified. Methods for controlling the ball drum mills based on the vibration acceleration signal from the mill's input support, the differential pressure across the mill drum, the air mixture temperature at the mill's outlet and the active power signal of BDM drive have been analyzed.

### REFERENCES

- [1] Pistun Y., Zahray V. and Fedoryshyn R. Automation and optimization of solid material grinding by means of ball mills // Collection of scientific works of the National Mining University. Dnipropetrovsk - 2011, No. 36, Volume 1, p. 122-127.
- [2] Wang, W., Bai, X. & Liang, W. 2019, "Optimization and transformation of 300MV units steel ball coal mill Pulverizing System", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- [3] Pistun, Y.; Fedoryshyn, R.; Zagraj, V.; Nykolyn, H. & Kokoshko, R. (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, Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.134
- [4] Lingfang, S., Jingmiao, S., Yinde, M., Congwei, F., Jibing, R. & Wei, Y. (2015), "Application research of PID-GPC algorithm in the ball mill system", Open Automation and Control Systems Journal, vol. 7, no. 1, pp. 157-166.



# *From Control Loss to Autonomous Operation: Failsafe Strategies for Modern UAVs*

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.106>

Andriy Khrystyuk  
National University of Water and Environmental  
Engineering, Rivne, Ukraine  
[a.o.khrystyuk@nuwm.edu.ua](mailto:a.o.khrystyuk@nuwm.edu.ua)

Oleksandr Cherniuk  
National University of Water and Environmental  
Engineering, Rivne, Ukraine  
[cherniuk\\_ak21@nuwm.edu.ua](mailto:cherniuk_ak21@nuwm.edu.ua)

**Annotation** — This paper analyzes the operating principles of the ExpressLRS radio control system for unmanned aerial vehicles (UAVs). It examines mechanisms for protecting UAVs from loss in the event of signal loss and explores various UAV behavior options in such situations. The study identifies possible ways to implement UAV protection mechanisms and highlights the potential for the UAV to perform a specific task even after radio communication with the operator is lost.

**Keywords** — UAV, ELRS, Failsafe, re-navigation

## I. INTRODUCTION

In an era of rapid technological advancement and a growing need for process automation, unmanned aerial vehicles (UAVs) are gaining increasing importance. They are widely used across many fields, such as monitoring, mapping, cargo delivery, agriculture, logistics, infrastructure projects, scientific research, rescue operations, and the military. UAVs contribute to improved task efficiency, reduced human risk, and lower operational costs.

Developing effective control systems and behavior models for UAVs is essential for their reliable and safe operation. Today's economic conditions drive businesses and organizations to implement cutting-edge technologies that enhance process optimization and increase competitiveness. In this context, creating high-quality UAV control systems is especially relevant [1].

In addition to civilian applications, UAVs play a significant role in the military domain. They are used for reconnaissance, surveillance, target acquisition, and even direct target engagement. Developing reliable UAV control systems is crucial to ensure their effective operation in combat conditions. Modern conflicts illustrate that UAVs are becoming an integral part of military operations, enhancing the precision and effectiveness of armed forces.

The objective of this study is to analyze the operating principles of the ExpressLRS radio control system for unmanned aerial vehicles (UAVs) and investigate the available mechanisms for protecting UAVs from loss in cases of signal failure. This involves exploring various UAV behavior models under signal loss scenarios, evaluating their feasibility, and proposing optimal strategies for effective UAV control in emergency situations.

## II. PROBLEM STATEMENT

ExpressLRS is an open-source radio control system designed to provide high data transmission speeds and long-range control for multirotors and other unmanned aerial vehicles (UAVs). It allows users to customize communication parameters for optimal performance in high-speed conditions and during long-distance flights, which is crucial for drone racing and first-person view (FPV) flights [2].

The ExpressLRS system is characterized by its high signal update rates and low latency, enabling operators to achieve maximum responsiveness and stable control of the aircraft. Its configuration offers flexibility and precision, which are essential for enhancing flight efficiency and meeting various operational tasks.

However, one of the pressing challenges that needs to be addressed today is ensuring the UAV's functionality in the event of a loss of control signal from the operator.

## III. SOLUTIONS TO THE PROBLEM STATEMENT

The ability of an aircraft to operate autonomously in the event of a loss of radio communication signal is a pressing issue for the functionality of many aerial vehicles today. The development of systems that create interference in the radio spectrum necessitates finding ways to combat these disruptions. There are several approaches to addressing this problem.

One option is to transition from radio control to wired optical fiber control systems. This provides nearly absolute protection from interference; however, it limits the UAV's range and maneuverability capabilities.

Another option involves developing mechanisms that use signal receivers operating on different frequencies with a difference of several hundred megahertz. This method can partially mitigate the loss of control, provided that the created interferences do not cover all frequency ranges.

A further solution is the development of systems capable of autonomously maintaining UAV flight based solely on the information they can gather during operation. Typically, this information includes data from the flight controller's gyroscope and the ability to receive video (either analog or digital) from the UAV's camera. By equipping such a system with high-quality imagery, sufficient computational power, and an

analysis system based on artificial intelligence, it can address both the problem of UAV functionality during a loss of control signal and the ability to perform specific tasks assigned to the aircraft.

Failsafe is a protection mechanism in radio control systems for unmanned aerial vehicles (UAVs) that activates when the drone loses signal from the remote control. If the drone ceases to receive commands from the operator due to reasons such as interference or exceeding the transmitter's range, the failsafe system automatically engages to minimize the risk of crashes or loss of the drone.

The configuration parameters for failsafe mechanisms can vary widely. For instance, in the Betaflight software environment, designed for flight controller firmware, the following primary actions can be configured:

**Motor Shutdown:** Upon losing communication, the drone immediately shuts down its motors to prevent uncontrolled flight.

**Hovering or Position Hold:** Some drones will maintain their current position while waiting for signal recovery.

**Return to Home (RTH):** The drone can return to its launch point (if equipped with GPS), which is particularly useful for long-distance flights.

**Soft Landing:** If the drone is in a safe area, the failsafe can initiate a gradual descent and landing.

However, none of these methods for handling signal loss and subsequent re-navigation will be effective if the computational capabilities of the flight controller are limited by a weak processor and insufficient onboard memory.

These limitations necessitate the installation of a separate computing unit onboard the UAV for automatic battlefield reconnaissance. Therefore, selecting an Orange Pi board is advisable due to its high capabilities and extensive functionality.

The connection of this system is sequential, meaning that the UAV's operation in normal mode should be managed by a pilot advancing toward enemy positions. Battlefield analysis begins as soon as the flight starts. If communication between the control module and the drone is lost for various reasons (interference or electronic warfare), the Orange Pi takes over control of the UAV without delay. At this moment, the drone's flight controller switches to ANGLE mode, which provides stabilization relative to the horizon. The Orange Pi computer reads data from the barometer and attempts to find the optimal throttle position.

Subsequently, a re-navigation system will operate, sending signals for THROTTLE, PITCH, and YAW to effectively hit the target, similar to the ELRS receiver's functionality.

Target recognition is achieved through the built-in digital camera on the Orange Pi, which operates independently and is unaffected by the digital or analog video stream received by the pilot. This ensures that the target recognition process remains functional even if the pilot's control interface experiences disruptions or delays. By utilizing the capabilities of the Orange Pi, the UAV can effectively analyze the visual data in real-time, allowing for accurate identification and tracking of targets without relying on the operator's video feed. This independence enhances the UAV's operational resilience and allows for more robust mission execution in various environments.

#### IV. CONCLUSIONS

Implementing a dedicated computing unit, such as an Orange Pi, enhances the UAV's ability to autonomously navigate and execute missions in the event of signal loss. By utilizing data from onboard sensors and artificial intelligence, these systems can effectively maintain flight stability and target acquisition, even in the absence of operator input.

The integration of robust failsafe mechanisms, advanced computing power, and intelligent navigation strategies presents a promising approach to mitigating the risks associated with signal loss in UAV operations. This comprehensive strategy not only enhances the reliability of UAVs but also expands their operational potential across diverse environments, making them valuable assets in both civilian and military contexts.

Future research and development should focus on refining these systems, exploring new algorithms for autonomous decision-making, and improving the resilience of UAVs against various types of interference. As technology continues to evolve, ensuring that UAVs can operate safely and effectively remains a priority for developers and operators alike.

#### REFERENCES

- [1] Kilby T., Kilby B. Getting Started with Drones. USA : Make Community, LLC, 2015. 204 c.
- [2] Betaflight Open Source Flight Controller Firmware [Электронный ресурс]. – Access Mode : <https://github.com/betaflight/betaflight>.
- [3] Support ExpressLRS. ESP32/ESP8285-based High-Performance Radio Link for RC applications. – Access Mode : <https://github.com/ExpressLRS/ExpressLRS>.

# Задача швидкодії одноланкового робота-маніпулятора з урахуванням малого впливу демпферних елементів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.107>

Андрій Бомба

Національний університет водного господарства і природокористування  
Рівне, Україна  
[abomba@ukr.net](mailto:abomba@ukr.net)

Василь Кот

Відокремлений структурний підрозділ «Рівненський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»  
Рівне, Україна  
[kotpm04@ukr.net](mailto:kotpm04@ukr.net)

**Анотація** — Розглядається задача оптимізації руху одноланкового робота-маніпулятора з урахуванням малого впливу демпферних пружин. Пропонується підхід, що забезпечує можливість мінімізувати час виконання циклічних операцій шляхом пошуку оптимальних режимів керування. Для вирішення цієї задачі пропонується використати метод збурень, який забезпечує належну точність. Наведено математичну модель системи та метод оптимізації, які можуть бути використані для підвищення продуктивності роботів-маніпуляторів у промисловості.

**Ключові слова** — одноланковий робот-маніпулятор; демпферні пружини; оптимізація руху; асимптотичний метод; циклічні операції; швидкодія; робот-маніпулятор;

## I. ВСТУП

Одноланкові роботи-маніпулятори є ключовими в промисловості завдяки своїй простоті, надійності та точності. Вони використовуються у виробництві, транспортуванні та інших сферах, де необхідна швидка та точна робота. Зростання вимог до продуктивності робить підвищення їх швидкодії критично важливим.

Оптимізація часу виконання операцій сприяє зменшенню енерговитрат та зносу обладнання. Демпферні пружини можуть впливати на динаміку, проте в разі їх незначного впливу необхідні додаткові дослідження. Однак, враховуючи їх вплив, не потрібно «розв'язувати задачу з нуля» – достатньо внести певні поправки до розв'язку спрощеної задачі (без урахування впливу демпферів).

У роботі пропонується метод оптимізації руху одноланкового робота з відносно малим впливом демпферних пружин, з використанням асимптотичного методу для досягнення точних та швидких результатів.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглядається одноланковий робот-маніпулятор, який переносить вантаж з початкового стану до кінцевого та повертається назад без вантажу. Він знаходиться під дією активного керування і

пасивних сил, що генеруються пружинними приводами. Завдання — оптимізувати рух з урахуванням малого впливу демпферних пружин для мінімізації часу операції.

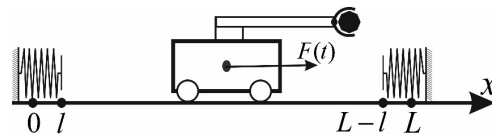


Рис. 1. Схема руху маніпулятора

## III. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Модель одноланкового маніпулятора включає каретку з вантажем, що має масу  $m(t)$  і рухається вздовж горизонтальної осі  $Ox$ . Пасивні пружинні приводи описуються лінійними залежностями, де сила, що діє на маніпулятор, прямо пропорційна його зміщенню [1].

Рівняння руху маніпулятора має вигляд:

$$m(t)\ddot{x}(t) = F(t) + \varepsilon F_p(x) \quad (1)$$

де  $x(t)$  – координата каретки в момент часу  $t$ ,  $F(t)$  – активна сила керування, а  $F_p(x)$  – сумарна сила пасивних приводів, що включає сили пружності,

$$m(t) = \begin{cases} m_0 + m_s, & 0 < t < t_0 \\ m_0, & t_0 < t < T \end{cases}, \quad t_0 - \text{час } t, \text{ коли каретка}$$

досягне до пункту призначення і почне повертатися назад,  $T$  – час, при якому каретка здійснить рух від початкового стану до кінцевого і повернеться назад,  $m_0$  – маса каретки,  $m_s$  – маса вантажу який перевозить маніпулятор,  $\varepsilon$  – малий параметр, який регулює вплив пружин на рух робота в початковому і кінцевому станах.

Сила  $F_p(t)$  визначається як:

$$F_p(x) = \begin{cases} k(l - x(t)), & x < l \\ 0, & l < x < L - l \\ -k(x(t) - (L - l)), & x > L - l \end{cases}, \quad (2)$$

де  $k$  - коефіцієнт жорсткості відповідного приводу,  $l$  - довжина вільного стану пружини,  $L$  - довжина шляху, який проходить робот-маніпулятор з початкового стану до кінцевого.

IV. ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ

Необхідно знайти активне керування  $F(t)$  при відомих параметрах пасивних приводів  $k, l$ , що мінімізує час виконання операції  $T$  ( $T \rightarrow \min$ ), забезпечуючи виконання наступних умов:

1. Початкові та кінцеві умови:

$$x(0) = 0, \quad x(T) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad \dot{x}(T) = 0 \quad (3)$$

2. Обмеження на активне керування:

$$F_{\min} < F(t) < F_{\max}, \quad \forall t \in [0, T] \quad (4)$$

3. Врахування малого впливу демпферних пружин:

$$\varepsilon \ll 1 \quad (5)$$

V. МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ

Активне керування при заданій прямолінійній траєкторії руху визначаються наближено з урахуванням впливу пружних сил першого порядку.

Вважатимемо, що маніпулятор, досягнувши точки  $L$ , не повертається назад, а продовжує рухатися вперед до точки  $2L$  (рис. 2).

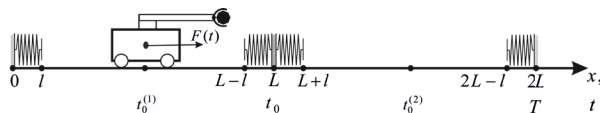


Рис. 2. Схема руху маніпулятора з фіктивною областю

Очевидно, що відстань між точками  $L$  та  $2L$  дорівнює відстані між початковою точкою  $0$  і точкою  $L$ . Область  $[L, 2L]$  є умовною (фіктивною) та відображає шлях маніпулятора у зворотному напрямку (від  $L$  до  $0$ ). Зв'язок між умовною та фізичною областями можна виразити наступним чином:

$$\tilde{x} = 2L - x, \quad (6)$$

де  $x$  — координата у фізичній області, а  $\tilde{x}$  — координата в уявній області.

Відповідно, якщо сила  $F(t)$  діє на маніпулятор у фізичній області, то сила  $\tilde{F}(t)$  в уявній області буде мати протилежний напрямок, щоб відобразити зворотний рух:  $\tilde{F}(t) = -F(t)$ . Таким чином, сила в уявній області є «дзеркальним» відображенням сили у фізичній області з врахуванням зміни знаку. У подальших формулах ми не будемо додатково позначати координату та силу в уявній області хвилькою, проте пам'ятатимемо про це. Крім того, припустимо, що пружини можуть стискатися до

однієї точки і в точці  $L$  на вагонетку буде діяти пружина яка штовхатиме маніпулятор в фіктивній області в додатному напрямку вздовж осі  $Ox$ .

Відповідно до цього умови задачі (2-3) необхідно записати у наступному вигляді:

$$F_p(x) = \begin{cases} k(l-x(t)), x < l \\ 0, l < x < L-l \\ -k(x(t)-(L-l)), L-l < x < L \\ k(L+l-x(t)), L < x < L+l \\ 0, L+l < x < 2L-l \\ -k(x(t)-(2L-l)), 2L-l < x \end{cases} \quad (7)$$

$$x(0) = 0, \quad x(t_0) = L, \quad x(T) = 2L, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad \dot{x}(t_0) = 0,$$

$$\dot{x}(T) = 0. \quad (8)$$

Зауважимо що решта співвідношень (1), (4-5) залишаються без змін.

Враховуючи малу величину параметра  $\varepsilon$ , розв'язок задачі можна представити як ряд за малим параметром, що описує вплив пружних сил. За асимптотичного підходу розв'язок подамо так [2,3]

$$x(t) = x_0(t) + \varepsilon x_1(t) + \varepsilon^2 x_2(t) + \dots \quad (9)$$

де  $x_0(t)$  - вироджений розв'язок, що відповідає ідеальному руху маніпулятора без урахування впливу пружних сил,  $x_1(t)$  - поправки до основного розв'язку, яка враховує вплив пружних сил.

Для знаходження членів асимптотичного ряду  $x_0(t), x_1(t), x_2(t)$ , і так далі... у рівняння руху маніпулятора (1) та умови (4), (7), (8) підставимо шуканий розв'язок у вигляді ряду (9). Потім, Здійснимо стандартну процедуру прирівнювання членів з однаковими степенями  $\varepsilon$  [3]. В результаті отримаємо послідовність підзадач для визначення асимптотик у вигляді диференціальних рівнянь з відповідними обмеженнями. Розв'язуючи її знаходимо шукані коефіцієнти асимптотичного ряду.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] М. В. Демидюк, П. М. Демидюк, М. І. Ширко Параметрична оптимізація циклічних транспортних операцій одноланкового маніпулятора з активними та пасивними приводами // Прикл. проблеми механіки і математики, вип. 21, с. 64–71, 2023. Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/apmm2023.21.64-71>.

[2] М. О. Рашевський, Асимптотичний аналіз нестационарних систем автоматичного керування, Математичне моделювання, № 2, с. 72–78, 2018. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mm\\_2018\\_2\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mm_2018_2_11).

[3] А. Я. Бомба, І. М. Присяжнюк, О. В. Присяжнюк, “Асимптотичний метод розв'язання одного класу модельних сингулярно збурених задач процесу масопереносу в різнопористих середовищах”, Доповіді Національної академії наук України, № 3, с. 28–34, 2013.

# Дослідження доцільності використання технології орнітоптера та розробка системи керування польотом

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.108>

В'ячеслав Вечер

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
bondar.v\_ak19@nuwm.edu.ua

Дмитро Реут

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
d.t.reut@nuwm.edu.ua

**Анотація** — У даній роботі представлено аналіз результатів дослідження технології орнітоптерів, визначення їх аеродинамічних характеристик, факторів, які впливають на ефективність та стабільність їх польоту, а також розроблені рекомендації щодо оптимізації конструктивних характеристик орнітоптера, їх переваг та недоліків у порівнянні з іншими типовими конструкціями БПЛА.

**Ключові слова** — автоматизація контролю польоту; БПЛА; орнітоптер;

## I. ВСТУП

Безпілотні Літальні Апарати (БПЛА) сьогодні є однією з основних технологічних галузей для розвитку та дослідження. Дана технологія є незамінною для збору розвідувальних даних різного значення, що вводить її в сферу комерційних послуг, наукової та військової діяльності. Остання зі сфер особливо актуальна для України, яка в умовах оборонної війни проти російської федерації активно використовує безпілотні системи у якості засобів протиповітряної оборони (ППО), керованих боеприпасів, розвідувальних апаратів тощо. Таким чином вдосконалення технологій БПЛА має стратегічне значення. Зростаючі вимоги до маневреності, автономності та енергоефективності підштовхують до пошуку нових підходів до конструювання безпілотників.

Однією з перспективних технологій є махове крило (орнітоптери), яке імітує природні рухи птахів та комах. У сферах застосування орнітоптери здатні запропонувати високу надійність польоту, коштом відсутності відкритих роторів і високої маневреності зумовленої здатністю до зміни форми крила. Такий дрон з високою ймовірністю буде здатний до польоту навіть після випадку зіткнення з об'єктом, що робить їх ефективними для застосування на малих висотах і у вузьких просторах. При цьому він лишається здатним до більших перельотів на висоті, що робить його універсальним.

Однак, попри перспективність, технологія орнітоптерів не отримала широкого впровадження в

областях, за винятком дослідницької. Основними причинами є конструктивні виклики, що до сьогодні не були доцільними до вирішення через наявність простіших у виконанні роторних дронів, а також через складнощі в забезпеченні стабільності польоту та точного управління.

Це дослідження має на меті оцінити доцільність впровадження орнітоптерів як сучасних безпілотних систем, зосереджуючись на вивченні їх аеродинамічних характеристик, ефективності та можливих шляхах удосконалення конструкції. Важливою частиною роботи є порівняння орнітоптерів з іншими типами БПЛА, щоб визначити переваги та недоліки цієї технології в різних умовах експлуатації.

## II. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД

### A. Основи технології орнітоптерів

Технологія махових крил, яка використовується в орнітоптерах, базується на природних механізмах польоту птахів і комах. Основний принцип полягає у створенні підйімальної сили та тяги через циклічні коливальні рухи крил, які взаємодіють з повітряними потоками. Ці коливання дозволяють орнітоптерам ефективно літати на низьких швидкостях і маневрувати у складних умовах, де інші типи дронів можуть бути менш ефективними.

Залежно від конструкції, орнітоптери мають кілька основних конфігурацій, які впливають на їх польотні характеристики:

- **Моноплан:** Орнітоптер з однією парою крил. Така конструкція забезпечує підвищену маневреність на низьких швидкостях і більшу простоту виготовлення, але може мати проблеми зі стабільністю на вищих швидкостях, якщо крила недостатньо жорсткі або неправильно налаштовані. Залежно від форми крила, точності балансування і розташування центру мас він може бути менш стабільним під час польоту на більших швидкостях.



- **Біплан:** Конструкція з двома парами крил, розташованими один над одним, що базується на принципах створення області зменшеного тиску між ними при розходженні та збільшенні відштовхування загальною площею крила. Така конструкція має додаткову підймальну силу та покращує стабільність польоту, ціною більших енерговитрат задля забезпечення необхідного зусилля та частот руху крила.
- **Тандемна схема:** Орнітоптер з двома парами крил, розташованими одне за іншим. Цей тип конструкції забезпечує можливість більш рівномірного розподілу ваги та підвищеної стабільності в польоті. Однак такі орнітоптери можуть втрачати маневреність, порівняно з монопланами, через складність управління обома парами крил одночасно.
- **Безхвості орнітоптери:** Орнітоптери, що у своїй конструкції позбавлені традиційного хвоста, де стабільність забезпечується коштом керування крилами. задля зниження ваги та аеродинамічного опору. Відсутність хвоста знижує вагу і аеродинамічний опір, проте такі орнітоптери менш стабільні і вимагають більш точної системи керування і навичок пілотування. Залежно від конструкції, як і будь-який інший дрон, орнітоптер є більш чи менш відповідним для різного роду завдань. Біплани та тандеми є найпопулярнішими і збалансованими схемами. Тандемні збірки є найбільш стійкими і схожі за характеристиками до коптерів.

Але ключовим елементом для ефективного польоту орнітоптера є здатність крила ефективно змінювати замахи підтримуючи баланс між підйальною силою і тягою, як це реалізовано зміною позиції крил птахів комах. Форма крил і механіка змаху є ключовими для ефективності польоту орнітоптера. Вибір форми крила впливає на баланс між підйальною силою і аеродинамічним опором.

Синусоїдальний або еліптичний рух [4], що поєднує плоский і горизонтальний замахи, збільшує ефективність та стабільність польоту навіть у турбулентних умовах. Використання легких та гнучких матеріалів зводить будь-який плоский чи горизонтальний замахи до певної форми коливання, але він це може бути реалізовано і методом механічного згину крила або його механічного спрямування.

Використання механічного спрямування позиції крила надає можливість більшої імітації живої природи, що означає можливості адаптуватися до швидкісного або маневреного польоту, але вимагає складного конструювання механізму передачі моменту, через що даний метод часто ігнорується. До нього ж слід віднести махання із затримкою у фазі, коли крила призупиняються в нижній точці змаху, забезпечуючи додаткову підймальну силу на певний час і даючи потоку повітря відступити від крила.

Єдиним оптимально реалізованим сьогодні способом оптимізації льотних характеристик

орнітоптера є додавання суглобів із направляючими, що реалізують зміну форми крила таким чином, що збільшує відштовхувальну силу замаху і зменшує опір у різні моменти руху крилом. Така складна і відрегульована конструкція суттєво збільшує вагу механізму, але, за правильної реалізації, це компенсується збільшенням характеристик тяги й підйальної сили.

Отже основною проблемою побудови орнітоптера є реалізація ефективного замаху. Будь-який рух, складніший за простий підйом-спуск, потребує механічного та/або програмного рішення. Свого часу подібна задача стояла при розв'язанні проблеми реалізації засобів контролю багатороторних БПЛА. У їх випадку проблема, як і результат її вирішення, мали чітку задачу синхронізації керування елементами системи, що визначало результат. Своєю чергою конструктивні особливості орнітоптерів є надто індивідуальними і потребують механічної реалізації, до того ж їх аеродинамічні принципи є недостатньо вивчені, через що будь-яка конструкція потребує додаткового аналізу для покращення бажаних характеристик.

Додатковою складністю слід зазначити забезпечення захисту від зношення двигуна при змінах тиску крила та посиленних крутних моментах при зміні повітряного потоку. Зміна навантаження на крило при замаху може виснажувати ресурс двигуна, що означає потребу у реалізації амортизації крутного моменту в редукторі силової установки

### В. Автоматизація процесів польоту орнітоптера

У даній роботі за основу використано модель орнітоптера “Freebird” представлену Натаном Хроністером у 1993 році.

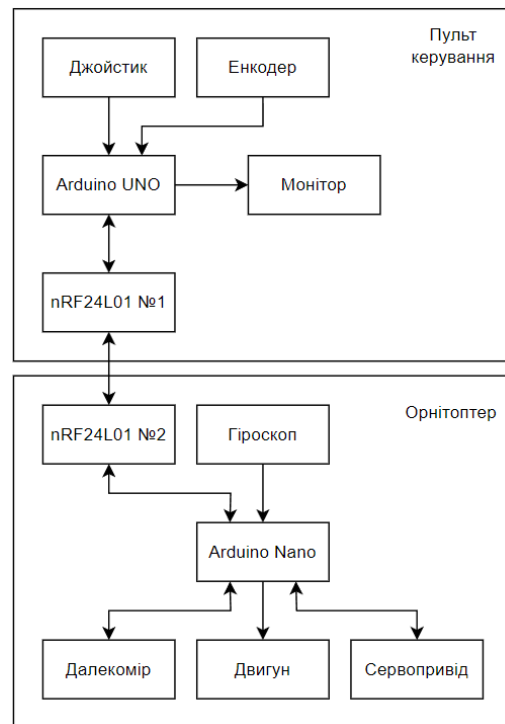


Рисунок 1. Структурна схема розробленої системи



Система складається з двох основних компонентів: пульта керування на основі Arduino UNO та самого орнітоптера на основі Arduino Nano. Загальна схема системи представлена на Рисунку 1.

Для ефективного управління орнітоптером йому необхідна інтеграція основного набору сенсорів задля моделювання стану орнітоптера у реальному часі [5] з метою регулювання. У цю групу входять:

- Гіроскоп: для отримання даних про кутові швидкості та лінійні прискорення, що дозволяє контролювати положення та орієнтацію апарату в просторі.
- Датчик положення крил: відстежує фазу та амплітуду махових рухів, що є критичним для синхронізації та контролю махання. Ним слугуватиме ультразвуковий датчик HC-SR04, закріплений перпендикулярно до крила в нижньому положенні.

Модулі NRF24L01 на контролері та дроні забезпечують двосторонній зв'язок із використанням парсингу. Використання парсингу структурує зв'язок між контролером та дроном, полегшуючи обробку команд і візуалізації даних телеметрії.

Контролер базується на мікроконтролері Arduino UNO, який отримує вхідні сигнали від джойстика та енкодера.

- Джойстик на контролері відповідає за керування поворотом хвоста орнітоптера, забезпечуючи маневрування під час польоту.
- Кнопка на джойстику використовується для перемикання між режимами польоту, такими як політ і планування.
- Енкодер регулює швидкість обертання двигуна, що задає частоту махання крил.
- Кнопка енкодера використовується для ввімкнення або вимкнення двигуна.

Під час запуску системи відбувається її калібрування. На певний час вмикається двигун, а далекомір фіксує мінімальне та максимальне значення відстані до крила. Після калібрування програма дає сигнал двигуна обертатися до положення, де відстань до крила максимальна. При активації режиму планування крило встановлюється на позицію, що відповідає 70% від максимального значення відстані, забезпечуючи оптимальне горизонтальне положення крил для планування.

Фіксація положення крила дозволяє також реалізувати «затримку у нижній фазі крила», для

підвищення ефективності відштовхування повітря. Двигун зупиняється на короткий час у нижній точці маху, коли відстань до крила мінімальна, дозволяючи потоку повітря покинути область крила не створюючи вихору, який би потягнув крило назад під час підйому. Час затримки змінюється вручну, відповідно до ваги і балансування дрона. Після затримки двигун продовжує обертання, виконуючи наступний цикл маху. Це збільшує ефективність тяги, але також підвищує навантаження на двигун, що впливає на його експлуатаційний ресурс.

Контроль звалювання працює на основі порівняння бажаних і реальних даних. Бажаними вважаються дані положення джойстика, а реальними є дані гіроскопа та нахилу сервопривода. Гіроскоп постійно вимірює кути нахилу дрона, і якщо значення перевищують встановлені межі, або якщо оператор задає команди, що можуть призвести до звалювання, система виконує коригувальні дії.

### III. ВИСНОВКИ

У даному дослідженні було оглянуто принципові особливості орнітоптерів як перспективного напрямку розвитку БПЛА. Враховуючи унікальні аеродинамічні характеристики орнітоптерів, можуть бути більш адаптивними для певних видів повітряного спостереження та транспортування. Проте, попри значний потенціал і адаптивність, орнітоптери вимагають набагато складніших методів моделювання, що робить технологію дорогою. Основною проблемою є впровадження ефективніших легких джерел живлення та механізмів передачі зусилля.

Розроблена система керування орнітоптером продемонструвала можливість автоматизації основних критеріїв польоту дрона на основі стандартних компонентів.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] "The Ornithopter Design Manual", [Online]. Available: <https://www.ornithopter.org/archive/ODM5.pdf>
- [2] "Other Flapping Wing Designs", ornithopter.de, [Online]. Available: <http://www.ornithopter.de/english/wings.html>
- [3] "Tracing the History of the Ornithopter: Past, Present, and Future", [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/7071/b298cf62e6b553588f09d4fcaa339ad9d9d9.pdf>
- [4] "Design, Development and Operational of an Ornithopter", [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/340741611\\_Design\\_Development\\_and\\_Operational\\_of\\_an\\_Ornithopter](https://www.researchgate.net/publication/340741611_Design_Development_and_Operational_of_an_Ornithopter)
- [5] "Conceptual Study of Ornithopter for Better Future Performance and Application", [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/374252970\\_Conceptual\\_Study\\_of\\_Ornithopter\\_for\\_Better\\_Future\\_Performance\\_and\\_Application](https://www.researchgate.net/publication/374252970_Conceptual_Study_of_Ornithopter_for_Better_Future_Performance_and_Application)

# Шляхи вдосконалення навігаційних систем для безпілотних літальних апаратів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.109>

Роман Дунець  
Національний університет «Львівська  
політехніка».  
м. Львів, Україна

Адріан Музиченко  
Національний університет «Львівська  
політехніка».  
м. Львів, Україна  
adrian.muzychenko@gmail.com

**Анотація** – У даних тезах розглядаються сучасні методи навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Особлива увага приділяється системам супутникової та інерціальним навігаційним системам. Аналізуються переваги і недоліки різних підходів до навігації, включаючи використання машинного навчання для підвищення точності і надійності систем. Досліджуються питання інтеграції різних типів навігаційних даних і їх обробки в реальному часі. Також розглядаються перспективи розвитку навігаційних технологій для БПЛА у контексті забезпечення безпеки польотів та автономного виконання завдань.

**Ключові слова** – безпілотні літальні апарати, навігація, GPS, інерціальні навігаційні системи, машинне навчання, інтеграція даних, безпека польотів.

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в останні роки обумовлений їх широким спектром застосувань у різноманітних сферах, від військових операцій до цивільних задач, таких як моніторинг навколишнього середовища, картографування, доставка вантажів та пошуково-рятувальні місії. Ключовим фактором, що визначає ефективність та безпеку польотів БПЛА, є наявність надійних та точних навігаційних систем. Традиційні методи навігації, такі як інерційні навігаційні системи (ІНС) та супутникова навігація, мають певні обмеження, пов'язані з розмірами, вагою, енергоспоживанням та вартістю компонентів. Розвиток мікроелектромеханічних систем (МЕМС) відкриває нові можливості для створення компактних, енергоефективних та економічно доступних навігаційних рішень для БПЛА.

МЕМС-датчики, зокрема акселерометри, гіроскопи та магнітometri, є основними компонентами сучасних інерційних навігаційних систем для БПЛА. Завдяки мініатюрним розмірам, низькому енергоспоживанню та високій стійкості до зовнішніх впливів, вони ідеально підходять для інтеграції в конструкцію літальних апаратів.

Акселерометри МЕМС вимірюють прискорення БПЛА за трьома ортогональними осями, дозволяючи визначити його траєкторію руху. Ці датчики реєструють як динамічні прискорення, спричинені рухом апарату, так і статичне прискорення,

зумовлене гравітацією. Шляхом подвійного інтегрування показань акселерометрів можна отримати дані про швидкість та переміщення БПЛА.

Гіроскопи МЕМС, своєю чергою, вимірюють кутові швидкості обертання навколо трьох осей, забезпечуючи інформацію про орієнтацію БПЛА в просторі. Ці датчики використовують ефект Коріоліса для реєстрації обертального руху. Інтегрування показань гіроскопів дозволяє визначити кути повороту апарату навколо осей крену, тангажу та ролання.

Магнітometri МЕМС застосовуються для визначення напрямку руху БПЛА відносно магнітного поля Землі. Вони вимірюють магнітну індукцію за трьома осями, що дозволяє визначити курс апарату. Проте магнітometri можуть бути чутливими до магнітних збурень, спричинених наявністю феромагнітних матеріалів або електромагнітних полів.

Комбінація даних з акселерометрів, гіроскопів та магнітometri МЕМС дає змогу отримати повну інформацію про положення та орієнтацію БПЛА в просторі. Проте МЕМС-датчики мають певні недоліки, зокрема накопичення похибок з часом через дрейф нуля та шуми вимірювань. Для мінімізації впливу цих факторів застосовуються алгоритми фільтрації та злиття даних, найпоширенішим з яких є фільтр Калмана. Цей рекурсивний алгоритм дозволяє оптимально поєднувати вимірювання різних датчиків, враховуючи їх статистичні характеристики та модель динаміки системи. Фільтр Калмана оцінює стан системи на основі попередніх вимірювань та прогнозує її поведінку, мінімізуючи середньоквадратичну похибку оцінки.[1]

Перспективним напрямком розвитку МЕМС-датчиків для навігаційних систем БПЛА є їх інтеграція з обчислювальними ядрами в єдину систему на кристалі (SoC). Такі рішення об'єднують акселерометри, гіроскопи, магнітometri, приймачі глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), а також потужні процесори для обробки даних в одному компактному модулі. Це дозволяє спростити архітектуру навігаційної системи, зменшити її розміри та енергоспоживання, а також підвищити надійність та стійкість до зовнішніх впливів.

Інтеграція МЕМС-датчиків з іншими методами навігації, такими як супутникова навігація та візуальна одометрія, відкриває нові можливості для створення комплексних навігаційних систем для БПЛА.[2] Супутникова навігація, зокрема GPS, забезпечує високу точність визначення положення апарату в глобальній системі координат. Проте вона може бути недоступною в певних умовах, наприклад, при втраті сигналу через перешкоди або навмисне глушіння. Візуальна одометрія, яка базується на аналізі послідовних зображень з бортових камер, дозволяє визначати переміщення та орієнтацію БПЛА відносно навколишнього середовища. Цей метод є автономним та не залежить від зовнішніх джерел інформації, проте також схильний до накопичення похибок з часом.

Комбінування МЕМС-датчиків з супутниковою навігацією та візуальною одометрією в єдину інтегровану навігаційну систему дозволяє компенсувати недоліки кожного з цих методів та отримати більш надійне та точне рішення. Інформація з МЕМС-датчиків використовується для безперервного відстеження руху БПЛА між оновленнями даних від супутникових приймачів та для корекції похибок візуальної одометрії. Своєю чергою, супутникова навігація та візуальна одометрія дозволяють періодично коригувати накопичені похибки МЕМС-датчиків та забезпечують абсолютну прив'язку до глобальної системи координат.[3]

Подальший розвиток МЕМС-технологій для навігаційних систем БПЛА спрямований на підвищення точності, стабільності та розширення функціональних можливостей датчиків. Впровадження нових матеріалів, таких як п'єзоелектричні та оптичні, дозволяє створювати датчики з покращеними характеристиками та меншою чутливістю до зовнішніх факторів. Вдосконалення конструкцій МЕМС-датчиків, зокрема використання багатовісних та диференціальних схем, сприяє підвищенню їх точності та зменшенню дрейфу нуля.

Важливим аспектом розвитку МЕМС-датчиків є оптимізація алгоритмів обробки даних та їх адаптація до специфічних умов застосування в БПЛА. Розробка нових методів фільтрації, таких як адаптивні фільтри Калмана, фільтри частинок та нейромережеві підходи, дозволяє ефективніше боротися з шумами вимірювань та покращувати точність оцінки навігаційних параметрів. Інтеграція МЕМС-датчиків з алгоритмами інерціальної

навігації, такими як безплатформні інерціальні навігаційні системи (БІНС), відкриває нові можливості для створення автономних навігаційних рішень для БПЛА.[4]

Перспективним напрямком є також поєднання МЕМС-датчиків з технологіями штучного інтелекту, зокрема з глибокими нейронними мережами. Застосування методів машинного навчання дозволяє автоматично виявляти та компенсувати систематичні похибки датчиків, адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища та підвищувати загальну точність та надійність навігаційної системи.

Подальші дослідження в галузі МЕМС-технологій для навігації БПЛА спрямовані на вдосконалення характеристик датчиків, розробку нових архітектур систем на кристалах, оптимізацію алгоритмів обробки даних та інтеграцію з методами штучного інтелекту. Ці напрямки розвитку відкривають нові можливості для створення адаптивних, інтелектуальних та високоточних навігаційних рішень.

Розвиток МЕМС-датчиків та їх застосування в навігаційних системах БПЛА сприятиме розширенню функціональних можливостей безпілотних літальних апаратів та їх ефективному використанню в різноманітних сферах. Це дозволить покращити безпеку польотів, підвищити автономність БПЛА та розширити спектр задач, які вони можуть виконувати.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Comparing Kalman and particle filter approaches to coordinated multi-vehicle navigation / Mirabellot D., Sandersont A., Blidberg D.—// Proc. of the Int. Conf. UUST 2007.— 2007.— № 78.— [1, с.1-6].
- [2] Long-Distance GNSS-Denied Visual Inertial Navigation for Autonomous Fixed-Wing Unmanned Air Vehicles: SO(3) Manifold Filter Based on Virtual Vision Sensor / Gallo, E., Barrientos, A. — // Aerospace. — 2023. — Vol. 10, No. 8. — [2, с.708].
- [3] On autonomous navigation of unmanned aerial vehicles: 3D path planning and vision-based environmental mapping and machine learning / Petrov, P., Sarkisov, Y., Nadotozki, V. — // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. — 2020. — Vol. 35, No. 11. — [3, с.28-47].
- [4] Тристан А.В. Математичні моделі та методи планування повітряної розвідки рухомих й стаціонарних об'єктів з застосуванням БПЛА / А.В. Тристан., А.О. Бережний, І.М. Крижанівський // Збірник матеріалів VII-ої міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми інформатизації”. – Черкаси, 13-15 листопада 2019 р. – Т. 3. – [4, с.41].

# Моделювання імовірності відмови автоматичного газового захисту шахти

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.110>

Володимир Ільчук

Національний університет водного господарства та  
природокористування  
м. Рівне, Україна  
v.v.ilchuk@nuwm.edu.ua

Владислав Глушук

Національний університет водного господарства та  
природокористування  
м. Рівне, Україна  
hlushchuk\_ak21@nuwm.edu.ua

**Анотація** – Розроблено імовірнісну математичну модель, з використанням логіко-імовірнісного методу та дерева відмов, автоматичного газового захисту шахти, що дозволяє оцінити імовірність виникнення події «вибух» в гірничій виробі. Необхідність удосконалення захисту при стаціонарних і нестационарних процесах метанотворення підтверджується перевищенням фактичної імовірності вибуху нормованого значення на два порядки.

**Ключові слова** – автоматичний газовий захист; імовірність відмови; вентиляція; надійність спрацювання; вибух газу; автоматичне знеструмлення

## I. АКТУАЛЬНІСТЬ ПИТАННЯ

Аерогазова обстановка дільниці шахти суттєвим чином визначає інтенсивність гірничих робіт та безпеку експлуатації обладнання. Підвищення метановиділення може спричинити вибух [1]. Для зниження імовірності вибухів використовується апаратура автоматичного газового захисту (АГЗ), наприклад УТАС, КАГІ. До складу таких апаратів входять давачі метану, які розташовуються у визначених точках забою. В разі перевищення допустимої концентрації забезпечується автоматичне захисне відключення напруги живлення. Відомо про підвищення точності роботи АГЗ за рахунок застосування штучного інтелекту [2]. Однак, в разі виходу давачів з ладу ефективність захисту суттєво знижується. Зокрема, у ході розслідування причин аварій на шахтах України [3], встановлено, що в більшості випадків контроль метану здійснювався незадовільно. До цього призводили: несправності давачів, електрообладнання, іскріння тощо. Тому актуальним є питання оцінювання надійності елементів апаратури АГЗ.

Мета – підвищення надійності функціонування АГЗ шахти в разі стаціонарного виділення метану та раптових викидів за рахунок моделювання імовірності відмови.

## II. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження імовірності відмови елементів АГЗ використовується логіко-імовірнісний метод. Математична модель АГЗ будується за допомогою методу дерева відмов. Виділяється один або декілька непрацездатних станів АГЗ, які можуть

мати небезпечні наслідки. Позначимо відмову системи захисту, яка може становити небезпеку, тобто перехід АГЗ в один з таких станів, головною подією. Остання виникає як результат некоректних дій персоналу, відмов елементів захисту тощо. Умови, які призводять до виникнення небезпечної відмови системи, зображуються у вигляді дерева відмов, що є логічною схемою. Для формування системи диференціальних рівнянь відносно імовірностей переходів, яка описує граф станів системи, використовується правило Колмогорова.

## III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Структуру події «вибух» ілюструє дерево на рис. 1. Вибух трапляється при співпадінні трьох подій: наявність вибухонебезпечної концентрації метану, виникнення джерела займання (іскри або дуги) та відмова АГЗ. Займання метаноповітряної суміші виникає при достатній потужності джерела займання. Відмови АГЗ виникають в разі відмови одного з елементів, зокрема – давача, лінії зв'язку, пристрою захисного відключення, сигналізації тощо. Формально подію  $B$  «вибух» можна виразити логічним виразом:

$$B = C \wedge I \wedge \bar{A}, \quad (1)$$

де  $C$  – змінна, що відповідає небезпечній концентрації метану;  $I$  – виникненню джерела займання;  $\bar{A}$  – відмові АГЗ.

Автоматичний газовий захист можна розглядати як відновлювану систему з послідовно з'єднаними елементами, у якій наявна профілактика та відсутнє резервування. Елементи пристрою прийняті послідовно з'єднаними, оскільки від працездатного стану одного з елементів залежить працездатний стан всієї системи.

На графі, рис. 2,  $E_1$  позначає працездатний стан автоматичного газового захисту,  $E_{0i}$  – аварійний простій через відмову  $i$ -го елемента і його відновлення,  $E_{2j}$  – стан планового простою  $j$ -го елемента для проведення профілактичних робіт,  $\lambda, \mu$  – показники інтенсивності відмов та відновлення, відповідно;  $k \leq n$ . Індекс 1 – давач метану, 2 – лінія зв'язку, 3 – аналізатор метану, 4 – схема захисного відключення та сигналізації. Відповідно до (1),

вибух виникає в разі співпадіння у часі подій  $C, I, \bar{A}$ , тому імовірність вибуху становить:

$$P_B = P_C \cdot P_I \cdot P_{\bar{A}}. \quad (2)$$

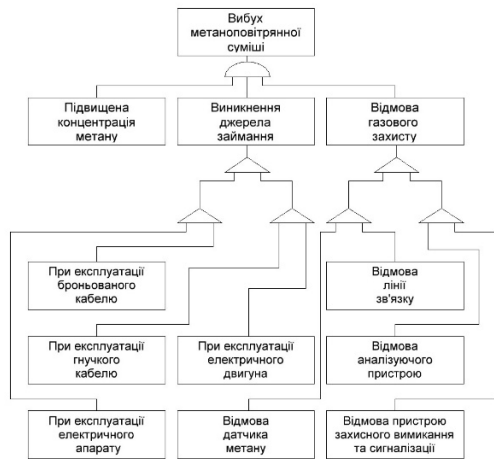


Рис. 1. Дерево відмов, що призводять до вибуху метаноповітряної суміші

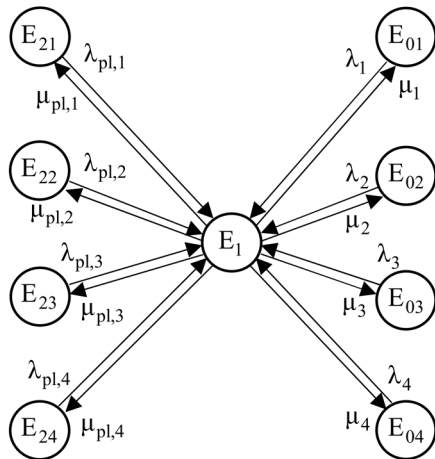


Рис. 2. Граф стану АГЗ

Прийmemo припущення  $P_C=1$ , що дозволяє змодельовати найгірший розвиток подій. Якщо прийняти припущення, що захисні пристрої (захист від витоків струму на землю або захист від коротких замикань) є абсолютно безвідмовними, то це не перешкоджає виникненню іскри від електрообладнання та кабелів, тому  $P_I \geq 0,036$ . Під станом  $\bar{A}$  розуміється непрацездатний стан автоматичного газового захисту. Останній може мати місце як при відмові окремих його компонентів, так і під час проведення профілактики. Стани системи (рис. 1) становлять повну групу подій, тому:

$$P_{\bar{A}} = 1 - P_1. \quad (3)$$

Система рівнянь, що описує імовірності переходу АГЗ між стійкими станами, має вигляд:

$$\begin{cases} dP_1(t)/dt = -\left(\sum_{j=1}^k \lambda_{p1,j} + \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) P_1(t) + \\ + \sum_{j=1}^k \mu_{p1,j} P_{2j}(t) + \sum_{i=1}^n \mu_i P_{0i}(t); \\ dP_{21}(t)/dt = \lambda_{p1,1} P_1(t) - \mu_{p1,1} P_{21}(t); \\ \dots \\ dP_{24}(t)/dt = \lambda_{p1,4} P_1(t) - \mu_{p1,4} P_{21}(t); \\ dP_{01}(t)/dt = \lambda_1 P_1(t) - \mu_1 P_{01}(t); \\ \dots \\ dP_{04}(t)/dt = \lambda_4 P_1(t) - \mu_4 P_{01}(t). \end{cases} \quad (4)$$

Рівняння (4) були розв'язані чисельними методами для часового періоду 1 рік. В результаті одержано залежність імовірності вибуху метану від часу. Така величина за 30 діб досягає сталого значення  $P_B=6,6 \cdot 10^{-4}$ , рис. 3.

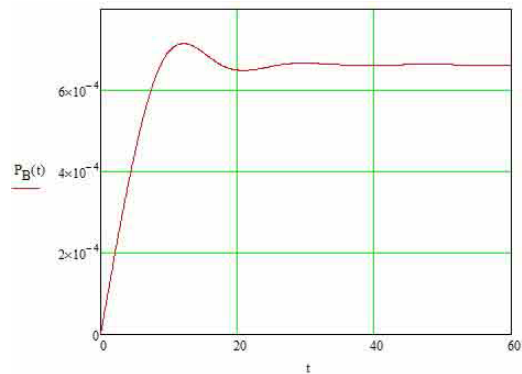


Рис. 3. Залежність імовірності вибуху  $P_B$  від часу  $t$ , діб

#### IV. ВИСНОВКИ ТА НАПРЯМОК ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Згідно з результатами моделювання, імовірність вибуху метано-повітряної суміші під час ведення гірничих робіт  $6,6 \cdot 10^{-4}$  є більшою на 2 порядки допустимої імовірності події «вибух», причому остання згідно з ДСТУ EN 60079-0:2017 не має перевищувати  $10^{-6}$ . Це підтверджує доцільність удосконалення АГЗ шахти. В ході подальших досліджень передбачається обґрунтувати структуру та параметри АГЗ з підвищеною надійністю функціонування.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Kundu, S., Zanganeh, J., Moghtaderi, B. (2016). A review on understanding explosions from methane-air mixture. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 40, 507–523. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.004>.
- [2] You, M., Li, S., Li, D., Xu, S. (2021). Applications of artificial intelligence for coal mine gas risk assessment. Safety Science, 143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105420>.
- [3] Крупка, Я.А., Зав'ялова, О.Л., Костенко, В.К., Костенко, Т.В. (2022). Використання спеціальних знань при розслідуванні вибухів газопилових сумішей у вугільних шахтах. Криміналістика і судова експертиза, 67, 507–518. doi: <https://doi.org/10.33994/kndisc.2022.67.51>

# Експериментальне дослідження цифрової системи випробовування високовольтних вимикачів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.111>

Мандзюк Роман  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
r.v.mandzyuk@nuwm.edu.ua

Древецький Володимир  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
v.v.drevetskyi@nuwm.edu.ua

Реут Дмитро  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
d.t.reut@nuwm.edu.ua

**Анотація** – Виконано експериментальне дослідження цифрової системи випробувань високовольтних вимикачів напругою 6-110 кВ, на основі розробленого стенду. Виконано заміри параметрів робочого циклу високовольтного вимикача 6 кВ, тип - вимикач пружинного приводу включення-відключення. Під час проведення експериментальних досліджень зафіксовано параметри спрацювання вимикача, які в подальшому порівняно з нормованими параметрами згідно «Норми випробовування електрообладнання» СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020

**Ключові слова** – цифрова система випробовування; високовольтні вимикачі; випробовування високовольтних вимикачів.

## I. ВСТУП.

Високовольтні вимикачі є ключовим обладнанням для забезпечення надійної та безперебійної роботи цілісної енергосистеми. Основна роль високовольтних вимикачів в енергосистемі полягає в забезпеченні надійної та безпечної комутації енергетичних ліній та обладнання[1]. Вони виконують такі ключові функції:

- Захист енергосистеми від аварійних ситуацій;
- Безперервність постачання електроенергії;
- Комутація елементів мережі;
- Підтримка стабільності напруги та частоти;
- Інтеграція відновлювальних джерел енергії.

Найбільш поширеними високовольтними вимикачами це вимикачі вакуумного типу. Основною характеристикою таких комутаційних апаратів є використання вакууму як середовища для гасіння електричної дуги. Коли контакти вимикача розмикаються, утворюється електрична дуга між ними. Вакуумна камера вимикача, де тиск наближається до абсолютного нуля ( $10^{-6}$  Па), не містить газів або рідин, тому дуга швидко згасає

через відсутність іонізованого середовища для підтримки електричного розряду. Це дозволяє вимикачу швидко розривати електричні ланцюги.

Метою роботи була побудова експериментальної установки для дослідження параметрів високовольтних вимикачів для забезпечення надійності досліджуваних комутаційних апаратів.

## II. ЦИФРОВА СИСТЕМА ВИПРОБУВАНЬ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ

Цифрова інтелектуальна система випробувань високовольтних вимикачів є комплексом обладнання та програмного забезпечення, призначеного для автоматизації процесу тестування та діагностики вимикачів на стадії виготовлення заводом-виробником. Дозволяє проводити точні вимірювання параметрів, виявляти потенційні проблеми на стадії виготовлення комутаційних апаратів. Використання таких систем підвищує надійність роботи вимикачів і знижує витрати на їх обслуговування.

Основними елементами цифрової системи випробувань є наступні елементи:

- Контрольно-вимірювальні пристрої, котрі проводять збір даних про електричні та механічні параметри вимикача під час спрацювання, до них відносяться сенсори для вимірювання напруги та струму, часу спрацювання, швидкості руху контактів;
- Програмне забезпечення для проведення аналізу даних, виявлення відхилення від нормальних параметрів спрацювання;
- Інтерфейс для взаємодії з оператором виконання випробувань, в першу чергу графічний інтерфейс для відображення в реальному часі стану вимикача та основних параметрів;
- База даних збереження результатів, дані, отримані під час випробувань, зберігаються у



відповідних баз, що дозволяє вести історію кожного вимикача, а також створення звітів та протоколів.

На рисунку представлено цифрову систему випробувань високовольтних вимикачів (Рисунок 1).

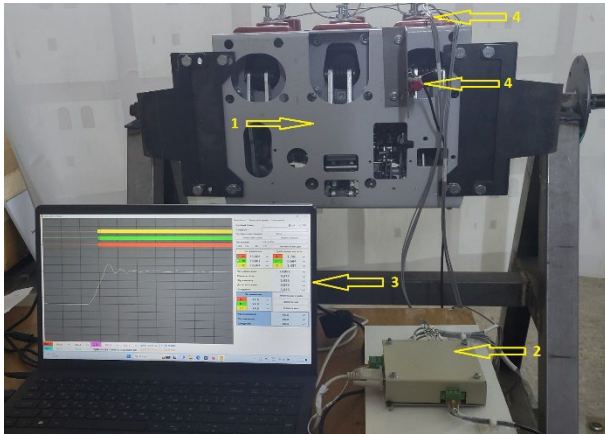


Рисунок 1. Цифрова система випробувань високовольтних вимикачів.

1. Об'єкт дослідження є вимикач вакуумний типу ВРС-10;
2. Плата управління цифрової системи випробувань на основі мікроконтролера STMicroelectronics STM32F030F4P6;
3. Програмне забезпечення для виведення аналізів проведення випробувань.
4. Датчик лінійного переміщення та контрольні вимірювальні провідники.

В порядку проведення випробувань визначаються наступні параметри:

- Час ввімкнення/вимкнення вимикача (а також дані фазного ввімкнення);
- Різномасштабність ввімкнення/вимкнення;
- Хід робочого контакту вакуумного переривника;
- Дотяг контакту;
- Швидкість ввімкнення/вимкнення контакту.

Зазначені параметри виводяться на монітор оператора випробувань з побудовою графіку проведення замірів (Рисунок 2.), також оператор має можливість визначення відстані між двома точками на графіку для більш чіткого значення часу увімкнення і відповідно вимкнення високовольтного вимикача.

Дані зберігаються в базі з відповідним порядковим номером вакуумного вимикача, для проведення подальшого аналізу на відповідність параметрів.

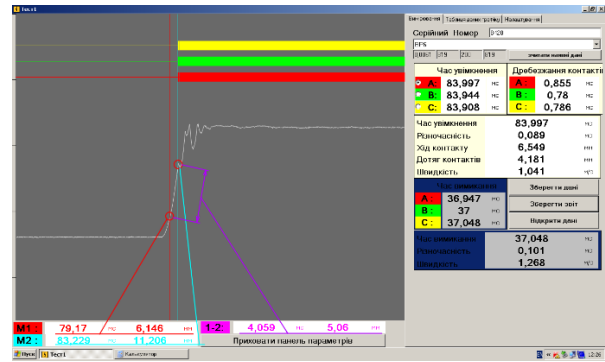


Рисунок 2 Графік проведення замірів

Зазначені параметри, взяті при проведенні експериментальних випробувань, порівняли з нормованими параметрами згідно «НОРМИ ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ» СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020 [2]. Та дійшли висновку, що параметри, взяті з дослідного випробування, відповідають нормам випробувань. В послідовності проводимо дослідження виготовлених вимикачів та формується база даних для проведення аналізу цифрової системи випробувань на можливість похибок вимірювання, та збоїв в процесі роботи установки.

### III. ВИСНОВОК.

В результаті дослідження цифрової системи випробувань високовольтних вимикачів, зменшено час проведення вимірювань у відповідності до традиційних методів вимірювань, та розрахунків, також визначили потребу в розширенні можливостей системи випробувань. Визначення середнього значення параметрів після проведення більше трьох замірів для одного і того ж вимикача.

Впровадження такої системи випробувань значно зменшить тривалість випробувань високовольтних вимикачів, підвищить надійність та ефективність високовольтного обладнання, знижуючи витрати на подальше його обслуговування та експлуатацію. Надалі формування бази даних результатів випробувань сприятиме виявленню потенційних відхилень і вдосконалення процесу діагностики та тестування.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Порівняльний аналіз високовольтних вимикачів різних типів. Ю.А.Романченко  
<https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-116-119>
- [2] «НОРМИ ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ» СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020 Міністерство енергетики та захисту довкілля України.

# Розробка системи моніторингу та контролю процесу відведення фільтраційних вод від земляних гребель

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.112>

Сафоник Андрій  
Навчально-науковий інститут енергетики,  
автоматики та водного господарства  
Рівне, Україна  
[a.p.safonyk@nuwm.edu.ua](mailto:a.p.safonyk@nuwm.edu.ua)

Таргоній Іван  
Навчально-науковий інститут енергетики,  
автоматики та водного господарства  
Рівне, Україна  
[i.m.tarhonii@nuwm.edu.ua](mailto:i.m.tarhonii@nuwm.edu.ua)

Пилипенко Володимир  
ПрАТ «Укргідроенерго»  
Гідротехнічний відділ  
Вишгород, Україна  
[v.pylypenko@uhe.gov.ua](mailto:v.pylypenko@uhe.gov.ua)

**Анотація** — розглянуто систему відведення фільтраційних вод на гідроенергетичних об'єктах. Розроблено автоматичну систему розрахунку витрати фільтраційного потоку для нагрітого водоміру з індикацією рівнів рідини, архівуванням даних в SCADA системі.

**Ключові слова** — автоматизація, фільтраційний потік, контроль, моніторинг.

## I. ВСТУП

Великий вплив на проведення експлуатації гідроенергетичних об'єктів та їх надійність має процес фільтрації води через, під і в обхід водопідпірних споруд. Контроль та моніторинг цього процесу є надзвичайно актуальним для земляних та бетонних гребель, адже характеристики фільтраційного потоку в межах цих споруд істотно впливають на надійність роботи всього об'єкту. До основних підконтрольних характеристик фільтраційного потоку відносяться положення депресійної поверхні, значення фільтраційних витрат, розподіл градієнтів напору і фільтраційних швидкостей в області фільтрації та ін. [1, 2]

Для відведення фільтраційних вод від ґрунтових гребель використовують спеціальні дренажні системи, де особливе місце займає питання визначення значень витрат фільтраційного потоку в різних місцях дренажної системи. Для вирішення цього питання використовують різні типи водомірних пристроїв. В даній роботі розглянуто систему контролю і моніторингу процесу відведення фільтраційних вод. Метою є розробка автоматичної системи розрахунку витрати фільтраційного потоку для нагрітого водоміру з індикацією і архівуванням даних в SCADA системі.

## I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для лабораторної установки з трапецієвидним нагрітим водоміром необхідно розробити систему, яка: вимірює рівень рідини до і після водоміру; розраховує витрату фільтраційного потоку; відображає мнемосхему експериментальної установки в режимі реального часу; відображає отримані дані в графічному вигляді та записує в архів отримані результати.

## II. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Для автоматизації процесу вимірювання рівня води розроблено шафу автоматизації, яка складається з: програмованого логічного контролера Siemens CPU 1215C; модуля розширення аналогових входів SM 1231 AI8x13 BIT; давача тиску bd sensors Imp 808; давача дифузного та світловідбиваючого режимів Pepperl+Fuchs UB800-18GM40-I-V1; НМІ панелі Schneider Electric HMIET6500, що представлена на рис.1..

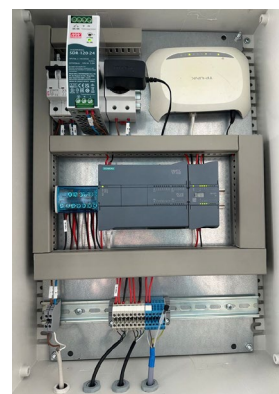


Рисунок. 1. Зовнішній вигляд розробленого щита автоматизації

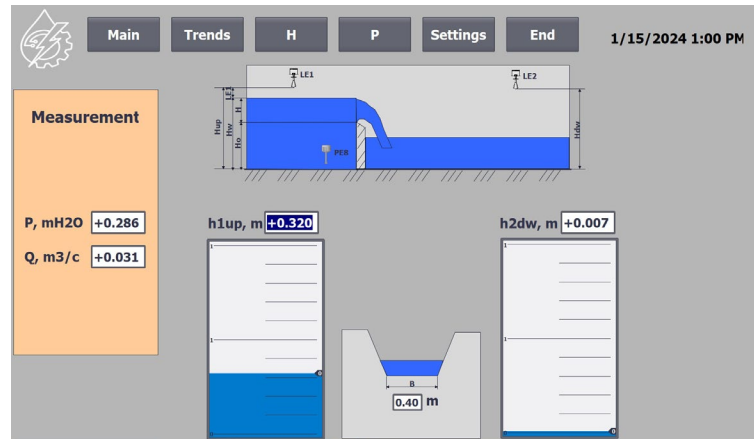


Рисунок 2. Мнемосхема експериментальної установки

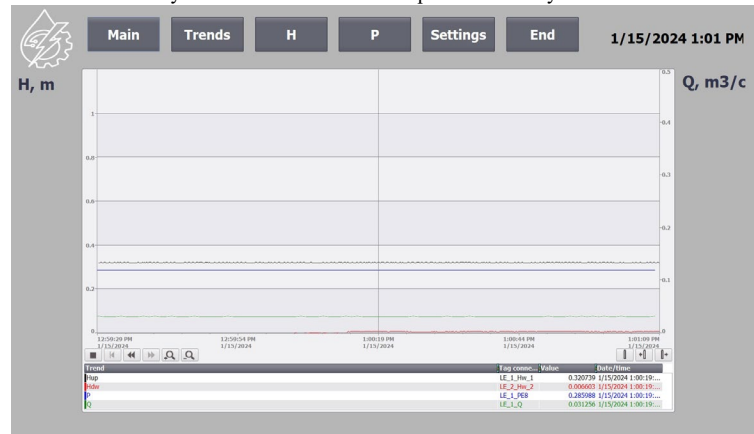


Рисунок 3. Вікно «Trends» де відображено зміну рівнів води непідітопленого водозливу

Детально автоматизацію процесів очищення рідин розглянуто в [3, 4]. Проте в наведених системах витрата стічних вод розглядається як константа. Для реальних систем це є змінна величина. Оскільки вартість давачів витрати є доволі високою, доцільним є непряме вимірювання витрати на основі рівня рідини. Для проведення дослідження зміни рівня рідини було розроблено щит автоматизації, на основі програмованого логічного контролера Siemens CPU 1215C з модулем розширення аналогових входів SM 1231 AI8x13 BIT. Дана конфігурація дозволяє підключити 8 аналогових давачів з уніфікованим сигналом, а також 14 дискретних входів, 10 дискретних виходів.

Автоматичне вимірювання рівня води в лабораторній установці проводиться наступним чином: при зміні рівня води в лабораторній установці давач, який підключено до аналогового входу модуля розширення надсилає сигнал 4...20 мА (в залежності від наповнення резервуару) про відстань до води на контролер, який перетворює його в цифрове значення за адресою %IW102 подається на блок масштабування FC1, відповідно до меж вимірювання давача. Оскільки потрібно вимірювати рівень води в резервуарі, то від початково заміряної відстані давача до дна установки віднімаємо отриману відстань і в

результаті отримуємо рівень води в лабораторній установці. Також розроблено SCADA систему для віддаленого доступу до контролера, відображення мнемосхеми процесу вимірювання рівня рідини в лабораторній установці рис.2., відображення динаміки зміни процесу рис.3., архівації отриманих даних, налаштування параметрів роботи установки

#### ВИСНОВКИ

Розглянуто систему контролю і моніторингу процесу відведення фільтраційних вод від земляних гребель. Розроблено автоматичну систему розрахунку витрати фільтраційного потоку для непідітопленого водоміру з індикацією і архівуванням даних в SCADA системі.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Справочник по гидравлике. Под ред. Большакова В.А. – К.: Вища школа – 1984. – 343 с.
- [2] Водомерные устройства для гидромелиоративных систем. Под ред. Киенчука А.Ф. – М.: Колос – 1982. – 144 с.
- [3] A.Safonyk, I.Targoni and I.Hrytsiuk, "Development and research of the electromagnetic installation for purification of process water from ferromagnetic impurities as an object of automation," *Elektron. model.* 2020, 42(4), pp. 87-102
- [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.

# Оптимізація системи регулювання витрати стічних вод в абсорбційно-біохімічній установці

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.113>

Андрій Сафоник  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[a.p.safonyk@nuwm.edu.ua](mailto:a.p.safonyk@nuwm.edu.ua)

Іван Таргоній  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[i.m.tarhonii@nuwm.edu.ua](mailto:i.m.tarhonii@nuwm.edu.ua)

Максим Трохимчук  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[trmama@ukr.net](mailto:trmama@ukr.net)

Дмитро Ластовецький  
Національний університет водного господарства та природокористування  
Рівне, Україна  
[d.o.lastovetskyi@nuwm.edu.ua](mailto:d.o.lastovetskyi@nuwm.edu.ua)

**Анотація** — проведено аналіз факторів, що впливають на якість очищення стічних вод в абсорбційно-біохімічній установці. Розроблено оптимізовану систему регулювання витрати стічних вод процесу їх очищення, що забезпечує компенсацію збурення, а саме нерівномірності розподілу вхідної концентрації забруднення.

**Ключові слова** — очистка, стічні води, оптимізована система, забруднення, автоматизація.

## I. ВСТУП

Очистка води є надзвичайно важливим процесом, адже вода є одним з ключових ресурсів для життя людей. Також якість очищених стоків несе прямий вплив на водні екосистеми. Використання у виробництві хімічних реагентів, які відрізняються по складу і концентрації забруднює стічні води, що шкодить екології довкола виробництва та може нанести непоправну шкоду екосистемі. Одним з методів очистки є біологічне очищення в абсорбційно-біохімічній установці. Так як керівники підприємств зазвичай тримають під таємницею, які реагенти використовують, то концентрація забруднення сильно змінюється як по складу, так і по величині надходження на очисні споруди. Важливим фактором, що впливає на активність поглинання бактеріями домішок є рівномірність надходження стічних вод [1,2].

Саме тому в даній роботі розглянуто оптимізацію процесу регулювання витрат стічних

вод в абсорбційно-біохімічній установці. Метою є забезпечення сталої витрати стічних вод в біореактор при дії збурень для забезпечення максимальної ефективності поглинання забруднення бактеріями.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для забезпечення сприятливих умов життєдіяльності бактерій є кілька важливих факторів: наявність забруднення, подача кисню, оптимальна температура та інші. Основним фактором є наявність забруднення, для сприятливої життєдіяльності бактерій. Але так як у виробництві стічні води збираються у проміжній ємності, то рівень і концентрація змінні, тому використання звичайного насоса забезпечить коливання витрати. Виходячи з вище сказаного, необхідно розробити і налаштувати автоматизовану систему, яка буде забезпечувати сталу витрату стічних вод для подачі на абсорбційно-біохімічну установку.

## III. ВИРШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Для регулювання витрати стічних вод розроблено систему, яка складається з НМІ панелі (Weintek MT8071iE), контролера (Siemens Simatic S7-1214), частотного перетворювача (SEW-Eurodrive MC07B0030-5A3-4-00), насосу (VEM MOTORS K21R 100 L4), давача витрати (Endress+Hauser), структурну схему якої наведено на рис. 1.



Рисунок. 1. Структурна схема регулювання витрат стічних вод

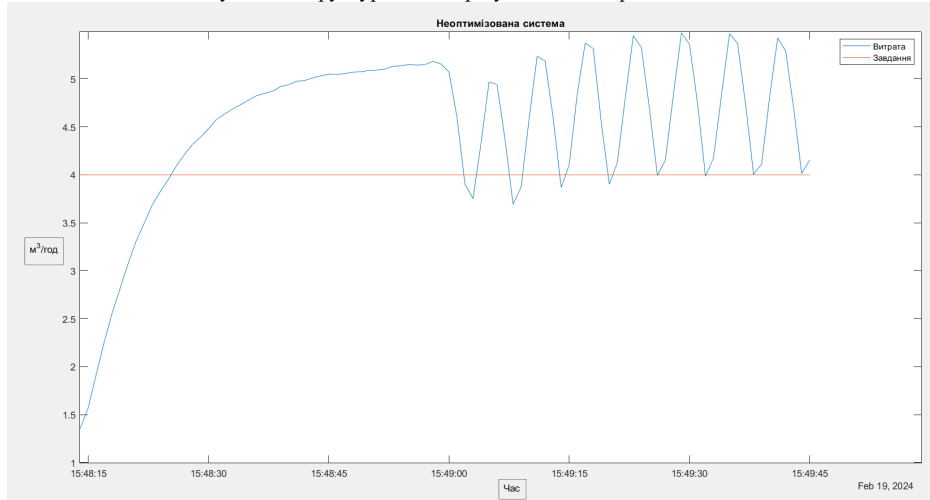


Рисунок. 2. Графік реальної неоптимізованої системи регулювання витрати стічних вод

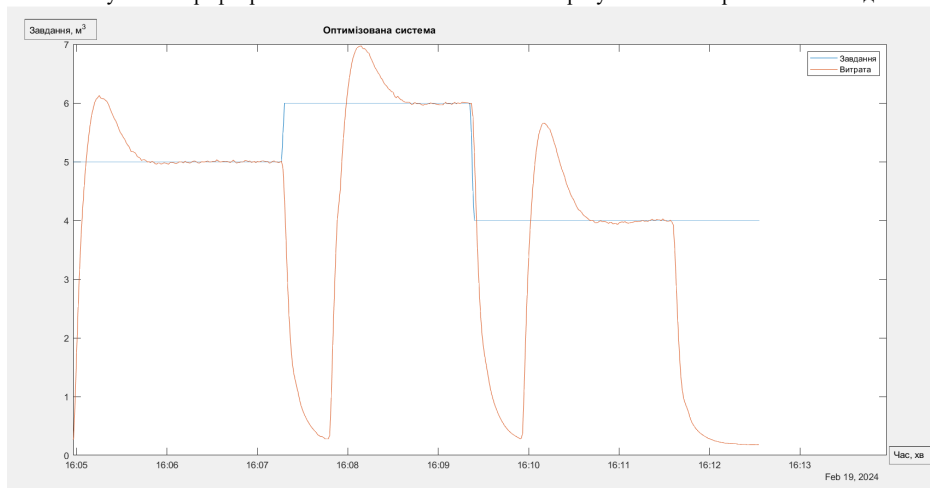


Рисунок. 3. Графік реальної оптимізованої системи регулювання витрат стічних вод

Дане обладнання використано для регулювання витрати стічних вод із стандартними параметрами ПІД регулятора ( $K_p=1$ ;  $K_i=20$ ;  $K_d=0$ ). Знявши дані зміни завдання і реальної витрати з допомогою СКАДА системи побудували графік реальної неоптимізованої системи, яку наведено на рис. 2.

З даного графіку визначаємо показники якості перехідного процесу неоптимізованої системи при завданні  $4 \text{ м}^3/\text{год}$ :

- Перерегулювання  $\sigma=28,75 \%$ ;
- Усталена похибка  $\delta_{уст}=-1,15$

Переглянувши отримані результати бачимо, що система не забезпечує сталу витрату, тому виникає задача оптимізації ПІД-регулятора.

Після проведення оптимізації налаштувань ПІД-регулятора отримали зміну витрати стічних води при різному завданні, як показано на рис. 3.

## ВИСНОВКИ

З наведених результатів на рис. 3 помітно, що після оптимізації налаштувань ПІД-регулятора показники якості перехідного процесу значно покращилися. Розроблена система керування сталою витратою стічних вод успішно впроваджена в реальний процес очистки стічних вод в абсорбційно-біохімічній установці.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] A.Safonyk, I.Targoniy and I.Hrytsiuk, “Development and research of the electromagnetic installation for purification of process water from ferromagnetic impurities as an object of automation,” *Elektron. model.* 2020, 42(4), pp. 87-102
- Safonyk, A., Tarhoni, 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.



# Визначення дефектів на друкованих електричних платах методом навчання без підкріплення

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.114>

Владислав Сельоткін  
НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського"  
Київ, Україна  
vlad.selotkin@gmail.com

Володимир Волощук  
НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського"  
Київ, Україна  
vl.volodya@gmail.com

**Анотація** – Контроль якості друкованих плат забезпечується шляхом використання алгоритмів комп'ютерного зору та нейронних мереж для виявлення дефектів, таких як замикання, розриви чи неправильне розташування компонентів. Автоматизовані системи контролю якості дозволяють швидко та точно ідентифікувати дефекти на ранніх етапах виробництва, що мінімізує витрати та забезпечує високу надійність продукції, особливо у критичних галузях, таких як медична та аерокосмічна техніка.

**Ключові слова** – комп'ютерний зір; визначення дефектів; друковані плати

## I. ВСТУП

У сучасному виробництві друкованих електричних плат якість продукції є критичним фактором для забезпечення надійності електронних пристроїв. Дефекти, такі як замикання, розриви чи неправильне розташування компонентів, можуть призвести до несправності пристроїв. Виявлення дефектів на платах на етапі виробництва дозволяє запобігти можливим збоєм та несправностям у майбутньому використанні. Більшість методів контролю якості часто базуються на підходах, що вимагають попередньої розмітки даних, однак у багатьох випадках отримання великих обсягів розмічених даних є дорогою та трудомісткою задачею.

Методи навчання без підкріплення відкривають нові можливості для автоматизованого виявлення аномалій без потреби у розмічених даних. Такі підходи дозволяють виявляти відхилення від норми, спираючись лише на особливості структури даних. У цій статті пропонується дослідити застосування методів навчання без підкріплення для аналізу та ідентифікації аномалій на друкованих електричних платах.

## II. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

Методи навчання без підкріплення набувають все більшого значення в галузі контролю якості друкованих електричних плат, оскільки вони дозволяють виявляти дефекти без необхідності у великій кількості розмічених даних. Традиційні методи контролю, такі як відповідність шаблонів або

аналіз сірої шкали, вимагають наявності попередньо визначених зразків або стандартних еталонів для порівняння. Вони добре працюють для конкретних типів дефектів, проте їхня ефективність суттєво знижується у випадках, коли кількість або типи дефектів заздалегідь невідомі, або якщо система стикається з новими варіаціями проблем. Крім того, процес отримання та розмітки зразків для традиційних методів може бути дорогим і ресурсозатратним.

Навчання без підкріплення пропонує підхід, при якому модель вивчає статистичні закономірності даних, щоб виявляти відхилення без потреби в чітких позначках дефектів. Такі методи дозволяють адаптуватися до нових типів дефектів та значно зменшують залежність від попереднього досвіду. Моделі, побудовані на цьому принципі, здатні ідентифікувати аномалії як відхилення від нормального патерну, навіть якщо такі дефекти раніше не зустрічалися в навчальному наборі. Це робить їх особливо ефективними для завдань, де важко передбачити всі можливі типи аномалій заздалегідь.

Одним із найпотужніших сучасних підходів до виявлення аномалій є метод PatchCore, який використовує поєднання локальних особливостей зображення для пошуку аномалій [1]. PatchCore об'єднує сильні сторони попередньо навчених моделей та методів зниження розмірності, таких як мета Patch-Encoder, для оцінки локальних відмінностей в області інтересу. Цей метод дозволяє ефективно працювати з великими зображеннями та виділяти лише ті частини, де є відхилення, що суттєво знижує обчислювальні витрати порівняно з класичними методами.

Переваги методів навчання без підкріплення включають:

- Гнучкість до нових дефектів
- Економія ресурсів
- Висока точність при невеликому наборі даних

Таким чином, методи навчання без підкріплення, зокрема PatchCore, є ефективним інструментом для виявлення аномалій у системах перевірки якості друкованих плат [2]. Вони забезпечують високу



точність, гнучкість та значну економію ресурсів, що робить їх переважним вибором у сучасних автоматизованих системах контролю якості.

### III. ОПИС ДОСЛІДЖЕННЯ

#### A. Набір даних

В експериментальних дослідженнях було використано набір даних VisA (Visual Anomaly Dataset) [3]. Цей набір даних призначений для дослідження та оцінки методів виявлення аномалій у візуальних даних. Він створений для вирішення завдань автоматичного виявлення дефектів на основі зображень, що може бути корисним у багатьох виробничих та індустріальних сценаріях, таких як перевірка якості на виробничих лініях. Набір даних містить велику кількість високоякісних зображень різних об'єктів, серед яких присутні як бездефектні зразки, так і зразки з різними видами дефектів.

VisA орієнтований на дослідження в області навчання без підкріплення та навчання з обмеженою кількістю розмічених даних, що робить його корисним для перевірки ефективності алгоритмів виявлення аномалій, які не потребують великих наборів даних з чіткими розмітками. Зображення в VisA охоплюють широкий спектр текстур, геометричних форм та типів дефектів, зокрема 4 набори даних друкованих плат зображені на Рис.1.

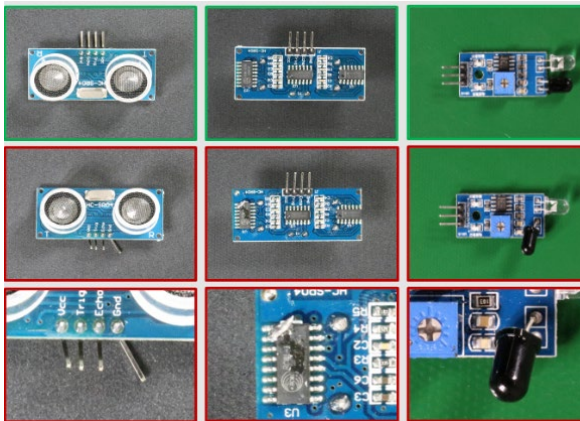


Рисунок 1. Приклад даних з набору даних VisA

#### B. Нейронна мережа PatchCore

PatchCore — це сучасна нейронна мережа для виявлення аномалій та дефектів у зображеннях, що базується на порівнянні локальних патернів. Її основна мета — виявлення відхилень від норми візуальних даних, що робить її ефективним інструментом для застосувань у виробництві та контролі якості. На відміну від класичних методів, які можуть покладатися на глобальні характеристики зображення, PatchCore фокусується на локальних особливостях і шукає аномалії на рівні невеликих патчів (ділянок) зображення.

PatchCore використовує попередньо навчені моделі для вилучення локальних ознак зображення. Ці ознаки являють собою фрагменти зображення (патчі), що відображають текстуру, колір та структуру конкретної ділянки. Оскільки порівняння всіх можливих патчів може бути обчислювально важким, PatchCore застосовує алгоритми вибірки або

зменшення розмірності для вибору найбільш репрезентативних патчів. Це дозволяє зберегти важливі характеристики зображення і водночас зменшити кількість даних, які потрібно порівнювати. Для кожного нового зображення алгоритм порівнює локальні патчі з базою нормальних патчів, які було збережено раніше. Якщо новий патч суттєво відрізняється від нормальних зразків, він позначається як аномалія. PatchCore використовує метрики відстані для оцінки схожості між новими патчами та зразками з бази даних. Чим більша відстань, тим більш ймовірно, що даний патч є аномальним. Після обробки всіх патчів зображення формується теплова карта, яка вказує на ділянки, що найбільше відрізняються від норми. Це дозволяє точно локалізувати аномалії на зображенні. Загальна структура алгоритму представлена на Рис.2.

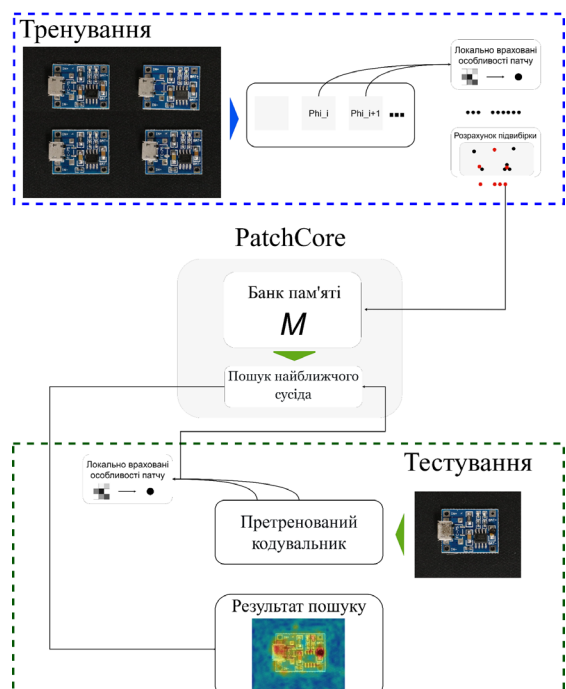


Рисунок 2. Діаграма нейронної мережі PatchCore

PatchCore відзначається високою ефективністю в задачах виявлення аномалій навіть на малих наборах даних та демонструє чудові результати в порівнянні з іншими підходами у задачах навчання без підкріплення.

### IV. РЕЗУЛЬТАТИ

На рівні зображень модель показала високі результати з точністю 87.00%, що вказує на здатність правильно класифікувати більшість зображень як аномальні або нормальні. Прецизійність склала 84.91%, що свідчить про високий відсоток правильно ідентифікованих аномальних зображень серед усіх зображень, класифікованих як аномальні. Водночас повнота досягла 90.00%, що означає, що більшість з усіх аномальних зображень були правильно виявлені. F1-міра, яка поєднує прецизійність і повноту, склала 87.38%, що демонструє загальний збалансований результат.

На рівні пікселів модель показала менш вражаючі результати. Індекс перекриття (IoU) склав 49.85%, що свідчить про обмежену точність у сегментації аномальних областей. Dice коефіцієнт, який є іншою метрикою, що враховує перекриття між передбаченими та реальними областями аномалій, склав 66.54%, що показує середню точність у сегментації на рівні пікселів.

Ці результати демонструють високу ефективність моделі для виявлення аномалій на рівні зображень, проте сегментація аномалій на рівні пікселів вимагає подальшого покращення для досягнення більш високих значень IoU та Dice коефіцієнтів.

Таблиця 1. МЕТРИКИ НА РІВНІ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ПІКСЕЛІВ

	Метрики	
	Рівень зображення	Точність
Прецизійність		0.849
Повнота		0.9
F1-міра		0.8738
Рівень пікселів	IoU (Індекс перекриття)	0.4985
	Dice коефіцієнт	0.6654

#### V. ВИСНОВКИ

Дослідження показало високу ефективність методів навчання без підкріплення для виявлення аномалій на друкованих платах, зокрема моделі PatchCore. Водночас існує необхідність подальшого

вдосконалення декількох аспектів, щоб підвищити якість результатів. Для досягнення більш високої точності виявлення аномалій на рівні пікселів слід збільшити роздільну здатність отриманих локальних ознак. Це дозволить точніше ідентифікувати дрібні дефекти, такі як мікротріщини чи непомітні зміни текстури, які не завжди можуть бути чітко відображені при нинішньому рівні деталізації ознак. Для забезпечення більш стабільної роботи системи необхідно підвищити стійкість моделі до таких факторів, як шум, дефекти камер або зміни умов освітлення. Це дозволить зменшити кількість помилкових спрацьовувань та підвищити надійність виявлення аномалій у реальних умовах виробництва.

Отже, оптимізація моделей шляхом покращення роздільної здатності та стійкості до шуму є ключовим кроком для досягнення більшої точності та стабільності у виявленні дефектів друкованих плат.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Roth, K., Pemula, L., Zepeda, J., Scholkopf, B., Brox, T., & Gehler, P. (2022). Towards total recall in industrial anomaly detection. 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). <https://doi.org/10.1109/cvpr52688.2022.01392>
- [2] Zipfel, J., Verwomer, F., Fischer, M., Wieland, U., Kraus, M., & Zschech, P. (2023). Anomaly detection for industrial quality assurance: A comparative evaluation of unsupervised deep learning models. *Computers & Industrial Engineering*, 177, 109045. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109045>
- [3] Zou, Y., Jeong, J., Pemula, L., Zhang, D., & Dabeer, O. (2022). SPOT-the-Difference Self-supervised pre-training for anomaly detection and segmentation. In Lecture notes in computer science (pp. 392–408). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20056-4\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20056-4_23)

# Аналіз можливостей налаштування системи керування двигунами безпілотною апарату на основі ПД регулятора

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.115>

Андрій Хрестюк

Національний університет водного господарства та природокористуванням.

м. Рівне, Україна

[a.o.khrystyuk@nuwm.edu.ua](mailto:a.o.khrystyuk@nuwm.edu.ua)

Олексій Литвиненко

Національний університет водного господарства та природокористуванням.

м. Рівне, Україна

[lytvynenko\\_ak20@nuwm.edu.ua](mailto:lytvynenko_ak20@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – У роботі проведено аналіз принципів та відмінностей звичайного ПД регулятора та його розширеної ПД-Ф модифікації. Проаналізовано налаштування фільтрів, ПД-Ф регулятора та процес налаштування системи керування, включаючи визначення параметрів фільтрів, налаштування D складової, балансу P/D та інших компонентів. Проведене дослідження показало, що правильне налаштування цих параметрів забезпечує високу стабільність та точність керування безпілотними апаратами

**Ключові слова** – модель ПД-регулятора, фільтри, бетафлайт, частота, БПЛА.

## I. ВСТУП

В умовах стрімкого розвитку технологій та зростання потреби в автоматизації різних процесів, безпілотні літальні апарати (БПЛА) відіграють все більш важливу роль у сучасному суспільстві. Вони знаходять застосування у широкому спектрі галузей, як наприклад: спостереження, картографування, доставка вантажів, сільське господарство, логістика, інфраструктурні проекти, наукові дослідження, рятувальні операції та військова справа. Використання БПЛА дозволяє значно підвищити ефективність виконання завдань, знизити ризики для людей та зменшити витрати.

Розробка ефективних систем керування такими БПЛА є дуже важливою для забезпечення їх надійної та безпечної експлуатації. Сучасні економічні умови вимагають від підприємств та організацій впровадження новітніх технологій, що сприяють оптимізації процесів та підвищенню конкурентоспроможності. У цьому контексті створення високоякісних систем керування БПЛА набуває особливої актуальності.

Окрім цивільного використання, БПЛА відіграють важливу роль й у військовій справі. Вони застосовуються для розвідки, спостереження, цілевказівки та навіть для безпосереднього ураження цілей. Розробка ефективних систем керування БПЛА є критично важливою для забезпечення їх надійної та безпечної експлуатації в умовах бойових дій. Сучасні конфлікти демонструють, що БПЛА стають невід'ємною

частиною військових операцій, підвищуючи точність та ефективність дій збройних сил.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Betaflight - це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, орієнтоване на продуктивність польоту, використання передових функцій і широку цільову підтримку мультикоптерів та БПЛА з фіксованим крилом. Воно забезпечує високу стабільність та точність управління від оператора, що важливо для швидких маневрів і польотів на високих швидкостях. Betaflight це програмний продукт, що головним чином орієнтований на гоночні квадрокоптери, вільні польоти та FPV (first-person view) [2]. Проте доступність та гнучкість роботи та можливості налаштувати систему БПЛА самостійно під різні задачі робить його ефективним засобом. Важливою задачею налаштування системи керування є отримання оптимальних параметрів, які забезпечать стабільність руху БПЛА, швидкий та коректний відгук апарату на вказівки оператора

## III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Фільтри - це алгоритми, призначені для зменшення впливу шумів та вібрацій на роботу контролера.

Для фільтрації шуму з даних гіроскопа в Бетафлайт використовується два типи фільтрів: low pass - фільтри низьких частот (ФНЧ) та notch - режекторні фільтри (РФ).

Low pass фільтр - послаблює високі частоти після заданої частоти зрізу, а інші, більш низькі, пропускає без змін. При наближенні до частоти зрізу амплітуда сигналу плавно згасає, поки не стане на 3 дБ менше, або ж на 50%, потім послаблення продовжується та збільшується, що дозволяє майже не пропускати шуми на більш високих частотах.

В Бетафлайт реалізовано декілька видів фільтрів низьких частот:

PT1 - звичайний фільтр першого порядку. Він є найпростішим типом фільтра низьких частот у програмі і використовується для базового згладжування сигналів.

Характеристики:  
 + невелика фазова затримка. Фільтру потрібно небагато часу на обробку сигналу, а отже система буде реагувати швидше;

- полого смуга затримки. Пропускає більше шуму в порівнянні з іншими фільтрами

РТ2 та РТ3 - фільтри другого та третього порядку. Забезпечують кращу фільтрацію високочастотних шумів порівняно з РТ1.

Характеристики:  
 + більша крутизна смуги затримки в порівнянні з РТ1;

- більша фазова затримка.

Vi-quad - двополосний фільтр Баттерворта.

Характеристики:  
 + набагато більша крутизна смуги затримки, пропускає менше шуму;

- ще більша фазова затримка в порівнянні з РТ-фільтрами.

Бетафлайт є програмним продуктом з відкритим вихідним кодом, що дало можливість дослідити програмну реалізацію фільтрації даних та реалізувати їх математичні моделі у MATLAB (рис. 1 а) для наглядного дослідження фазо-частотних характеристик (рис. 1 б).

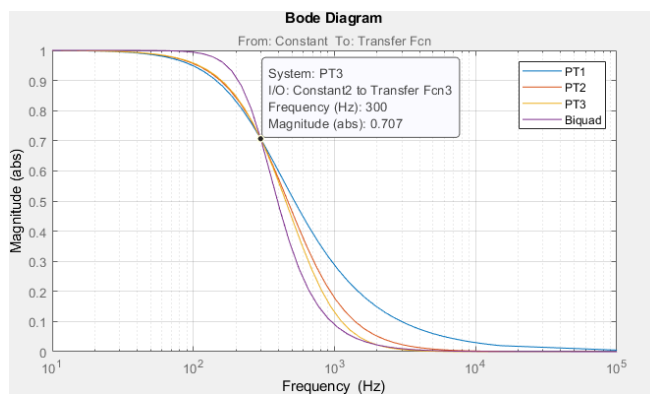
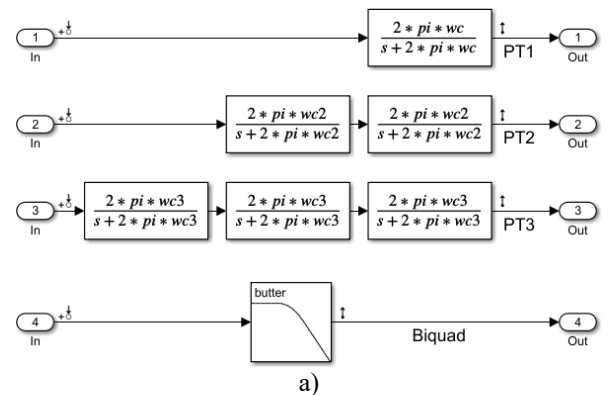


Рис. 1 Аналіз ФНЧ засобами MATLAB при частоті зрізу 300Гц

Notch фільтр - зменшує шуми навколо цільової частоти і пропускає без змін ті, що до та після неї. Як і в ФНЧ, на частоті зрізу послаблення сягає 50%, але враховуючи те що послаблення відбувається у деякому діапазоні, цей фільтр має дві частоти зрізу.

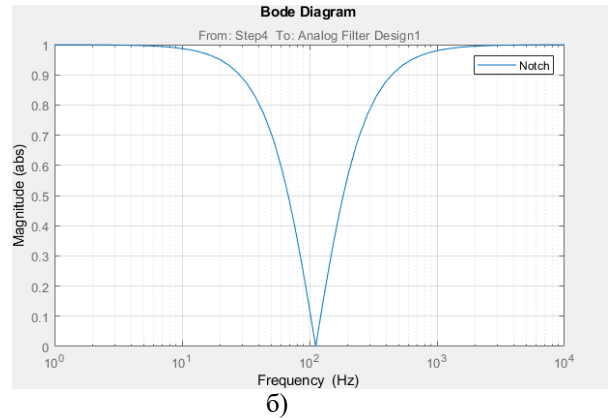
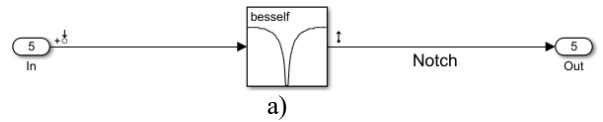


Рис. 2 Аналіз режекторного фільтра у MATLAB

Також у програмі реалізовано динамічні варіанти low pass та notch фільтрів. Вони мають той же принцип роботи, що і наведені вище фільтри, але їх частоти зрізу змінюються у процесі польоту.

Динамічний low pass - змінює свою частоту зрізу залежно від режиму роботи літального апарату.

Динамічний notch - підлаштовує свою частоту зрізу під пікові значення шуму у визначеному діапазоні.

RPM (revolutions per minute) - набір з декількох notch фільтрів, які змінюють свою цільову частоту в залежності від обертів двигунів. Мотори є основним джерелом шуму для більшості дронів.

PID регулятор - один з найрозповсюдженіших регуляторів, що використовується в системах автоматизації тих чи інших процесів. Працює за Пропорційно-Інтегрально-Диференціальним законом, що можна представити формулою:

$$P + I + D = K_p \cdot \epsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \epsilon(t) dt + K_d \cdot \frac{d(\epsilon(t))}{dt};$$

де  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  - коефіцієнти підсилення відповідних складових;

$\epsilon(t)$  - похибка.

Це можна представити у вигляді схеми (рис. 3).

Пропорційна складова домножує різницю між заданим та вимірним значенням (похибку) на деякий коефіцієнт. Тобто, чим більша відмінність між вимірним значенням і тим що потрібно, ти більшим буде вплив цієї складової.

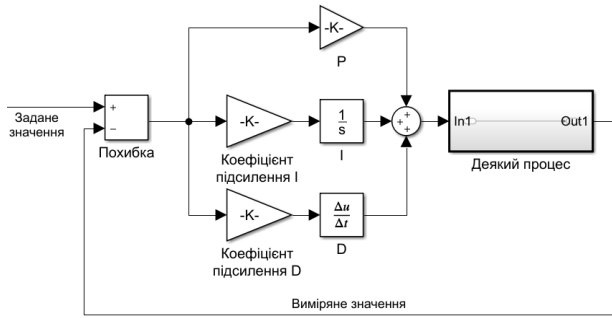


Рис.3 Структурна схема PID регулятора в MATLAB

Інтегральна складова є інтегралом похибки по часу і дозволяє враховувати її статичність. Це означає, що чим довше зберігається похибка, тим більшим буде вплив.

Диференціальна складова є похідною похибки по часу. Вплив цієї складової змінюється так, щоб повернути поточну похибку до значення попередньої.

PID-F регулятор влаштований подібно до звичайного, але D складова фактично розщеплена на дві частини – D складову та Feedforward, або ж «Випередження» (рис. 4).

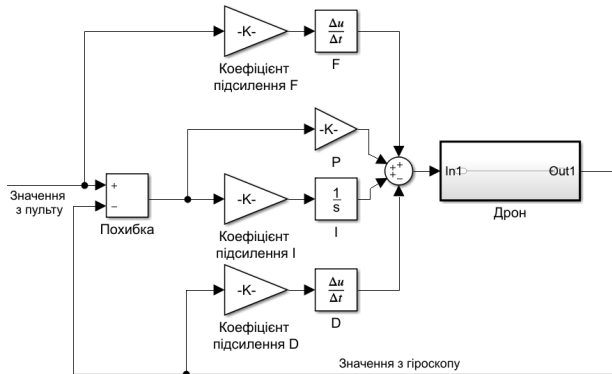


Рис.4 Структурна схема PID-F регулятора в MATLAB

Диференційна складова класичного ПІД регулятора є похідною похибки  $-\frac{de}{dt}$ . Оскільки похідна різниці дорівнює різниці похідних, дану формулу можна переписати як  $\frac{d(\text{задане})}{dt} - \frac{d(\text{виміряне})}{dt}$ . Таким чином, у PID-F версії регулятора, F є похідною заданого значення, а D - похідною виміряного значення зі знаком мінус.

Таке розділення дозволяє краще налаштувати регулятор і задати окреме підсилення для похідних від гіроскопу та заданого значення. А отже: через D складову можна налаштувати уповільнення змін в положенні БПЛА, тобто амортизувати його рухи, що дуже важливо, оскільки це допомагає уникнути перерегулювання і коливань, а через F складову - налаштувати затримку між заданим значенням та

гіроскопом, що покращує відстеження та реакцію на команди з пульта, особливо при швидких рухах.

Feedforward - одна з речей, яка відрізняє Бетафлайт від інших систем керування польотом і яка дуже впливає на те, наскільки точною може бути робота контролера при відстежуванні команди з пульта. Всього у системі є три ПІД регулятора, по одному на кожну вісь. Регулятори на Крен і Тангаж працюють однаково, але через принцип керування по осі Рискання у самому дроні, D складова в її регуляторі відсутня.

Процес налаштування системи керування складається з декількох етапів:

1. Попередня підготовка: включає перевірку апаратної частини, програмного забезпечення, перевірку та налаштування керування, ввімкнення процесу реєстрації історії польоту (чорної скриньки) та інші підготовчі кроки.
2. Тестові польоти для забору історії відгуків апарата на дії оператора.
3. Аналіз даних з чорної скриньки.
4. Налаштування фільтрів.
5. Налаштування ПІД-регуляторів.

Якісне налаштування фільтрації полягає у використанні якомога меншої кількості фільтрів для забезпечення швидкого та адекватного відгуку системи, при усуненні всіх зайвих шумів. Якщо фільтри пропускають занадто багато шумів, у PID-F регуляторі вони помножуються та можуть призвести до некоректної роботи контролера, тряски БПЛА, втрати керованості та навіть до перегрівання і згорання двигунів.

Для аналізу даних чорної скриньки, ми використали програмне забезпечення Blackbox explorer.

Відкривши файл з даними, переходимо у «Graph setup» та обираємо потрібні графіки для побудови. Тут можна прослідкувати як змінювалися різні значення у процесі тестового польоту, наприклад, впливи складових PID-F регуляторів по різним осям, задане значення та отримане з гіроскопа, мотори та ін. (рис.5).



Рис.5 Дані чорної скриньки у Blackbox explorer



Для визначення параметрів фільтрів будемо спектрограми значень з гіроскопу. Це тривимірна спектрограма, яка відображає шуми, з врахуванням тяги (ри.6).

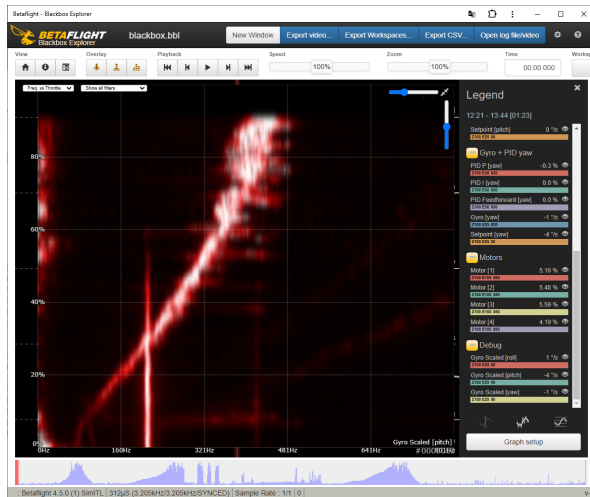


Рис.6 Спектрограма шумів по осі Крен у Blackbox explorer

Для знаходження найкращих значень коефіцієнтів ПІД регулятора існують різні методи, які включають зміну від одного до всіх параметрів, але оскільки у Бетафлайт значення за замовчуванням добре збалансовані та підходять для більшості БПЛА, змінювати абсолютно все немає потреби.

Чим менший коефіцієнт D, тим більше БПЛА буде схильним до самотурбулентності та гірше реагуватиме на зміну керування, але при цьому буде більш стійким до вібрацій від механічних елементів апарату.

Якщо D зависоке, це призведе до збільшення швидких коливань, втрати керування, підсилення шумів та перегріву або згорання двигунів.

Ідеальне значення D забезпечить хороше відпрацювання самотурбулентності, збільшення відгуку керування та більшу стабільність системи в цілому, хоча від цього зменшиться стійкість до вібрацій.

Тому, як правило намагаються знайти максимально можливе і зручне для пілота значення D, при цьому забезпечуючи помірне нагрівання двигунів. Так, для 5 дюймового БПЛА, в залежності від досвіду пілота, D встановлюють від 30 (для новачків або не дуже хорошої конструкції апарату) до 45+ (експерти з значним досвідом у пілотуванні, хорошою конструкцією та мінімальними вібраціями апарату).

Знайти відповідне значення складової D можна наступним чином:

1) Скинути всі значення вкладки «Налаштування профілю ПІД» за замовчуванням.

2) Зменшити значення «Динамічне демпфування» на 0.

3) Задати «Головний множник» на 0.5 та поступово збільшувати або зменшувати.

4) Виконати тестовий політ з достатньо різкими рухами.

5) Перевірити чи не перегріваються двигуни та чи відсутні зайві вібрації та шуми.

6) Повторювати дії з кроку 3, до отримання значення, при якому не виникає помітних проблем і максимально адекватне відпрацювання БПЛА команд оператора.

Далі потрібно знайти баланс між P та D складовими. Спочатку, на 0 виставляються повзунки «Коефіцієнт упередження» та «I коефіцієнт», «Слідування» встановлюється на 0.5 та з кожним тестовим польотом збільшується на 0.05-0.2 поки не будуть відчуватися вібрації. Однак при цьому кожен раз потрібно зберігати дані чорної скриньки, щоб проаналізувати їх згодом.

При налаштуванні I, важливо пам'ятати, що ця складова є інтегруючою. Це означає, що вона завжди досягатиме одного і того ж значення і з такою ж силою намагатиметься усунути статичну похибку PID. Якщо коефіцієнт підсилення I низький, знадобиться багато часу, щоб накопичити вплив на похибку, і так само якщо вона змінить знак, а зависокий спричинить коливання.

#### IV. ВИСНОВКИ

У представленій роботі проведено аналіз принципів та відмінностей звичайного ПІД регулятора та його розширеної ПІД-F модифікації. Проаналізовано налаштування фільтрів, ПІД-F регулятора та процес налаштування системи керування, включаючи визначення параметрів фільтрів, налаштування D складової, балансу P/D та інших компонентів. Проведене дослідження показало, що правильне налаштування цих параметрів забезпечує високу стабільність та точність керування безпілотними апаратами

#### ЛІТЕРАТУРА

[1] Kilby T., Kilby B. Getting Started with Drones. USA : Make Community, LLC, 2015. 204 с.  
 [2] Betaflight Open Source Flight Controller Firmware [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://github.com/betaflight/betaflight>.  
 [3] Understanding ESCs for FPV Drones [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://oscarliang.com/esc>.





За підтримки проекту SCIENCE AT RISK Emergency Office

**SCIENCE  
AT RISK**  
Emergency Office

by Akademisches Netzwerk Osteuropa e.V.  
Postfach 4 03 23  
10 062 Berlin  
[www.science-at-risk.org](http://www.science-at-risk.org)

**Team Ukraine**  
[support.ukr@science-at-risk.org](mailto:support.ukr@science-at-risk.org)  
+49 173 2748344  
+49 525 2022033



**САН ЛАЙМ  
ЕНЕРДЖИ ЛТД**



Наукове видання

**Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції  
«Моделювання, керування та інформаційні технології»**

*Відповідальний за випуск*                      *Андрій Сафоник*

*Технічний редактор*                              *Галина Сімчук*

*Підготовлено до друку*                         *Басюк Тетяна*

Підписано до друку 29.11.2024 р. Формат 70×100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Ум.-друк. арк. 21,3. Обл.-вид. арк. 22,4.  
Тираж 100 прим. Зам. № 5648.

*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.*

