

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)



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

VI МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

9–11 листопада 2023
Рівне, Україна

Матеріали конференції

Рівне
2023

**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)**



«Modeling, control and information technologies»

VI INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

9–11 November 2023
Rivne, Ukraine

Conference materials

Rivne
2023

ISBN 978-966-327-578-9

ISSN 2707-1049 (Online)

ISSN 2707-1030 (Print)

МІЖНАРОДНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Мошинський Віктор (Україна)	Литвиненко Володимир (Україна)
Кушнір Роман (Україна)	Ляшко Сергій (Україна)
Бомба Андрій (Україна)	Мазурек Павел (Республіка Польща)
Сафоник Андрій (Україна)	Наконечний Олександр (Україна)
Мартинюк Петро (Україна)	Нагарая Шішір (Велика Британія)
Агратіні Октавіан (Romania)	Пасічник Володимир (Україна)
Бігун Ярослав (Україна)	Паталяс-Малішевська Юстина (Республіка Польща)
Бурдук Анна (Республіка Польща)	Річ Лі (Тайвань)
Волощук Володимир (Україна)	Роск Ізабела (Республіка Польща)
Воробель Роман (Україна)	Сабзієв Ельхан (Азербайджанська Республіка)
Вуйцік Вальдемар (Республіка Польща)	Савіна Наталія (Україна)
Гамзе Гюрзой (США)	Тадєєв Петро (Україна)
Герасімов Євгеній (Україна)	Трофимчук Олександр (Україна)
Гордійчук Павло (США)	Турбал Юрій (Україна)
Грицюк Петро (Україна)	Федорчук Володимир (Україна)
Древецький Володимир (Україна)	Цешко Мечислав (Республіка Польща)
Качмарек Маріуш (Республіка Польща)	Черлінка Василь (Словацька Республіка)
Квасніков Володимир (Україна)	Чачанідзе Гурам (Грузія, Сакартвело)
Когут Петро (Україна)	Чертов Олег (Україна)
Комада Павел (Республіка Польща)	Шаховська Наталія (Україна)
Крстич Драгана (Республіка Сербія)	
Круліковський Борис (Україна)	
Кубік Юзеф (Республіка Польща)	

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Сафоник Андрій, Мартинюк Петро, Бойчура Михайло, Волощук Володимир, Джоші Олена, Жуковський Віктор, Жуковська Наталія, Мічута Ольга, Назарук Віталій, Пінчук Олег, Присяжнюк Олена, Прищепа Оксана, Турбал Юрій, Уляньчук-Мартинюк Оксана, Христюк Андрій

Відповідальний за випуск: **Сафоник Андрій**

Підготовлено до друку: **Жуковська Наталія**

Матеріали конференції розглянуті і рекомендовані до видання на Вченій раді
Національного університету водного господарства та природокористування
27 жовтня 2023 р., протокол № 10

Моделювання, керування та інформаційні технології: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. [Електронне видання]. – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 2023. – 297 с.

ISBN 978-966-327-578-9

© Національний університет водного господарства та природокористування, 2023

ISBN 978-966-327-578-9

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)

Bigun Yaroslav (Ukraine)

Burduk Anna (Poland)

Voloshchuk Volodymyr (Ukraine)

Vorobel Roman (Ukraine)

Wójcik Waldemar (Poland)

Gamze Gürsoy (USA)

Gerasimov Ievgenii (Ukraine)

Gordiichuk Pavlo (USA)

Hrytsiuk Petro (Ukraine)

Drevetskyi Volodymyr (Ukraine)

Kaczmarek Mariusz (Poland)

Kvasnikov Volodymyr (Ukraine)

Kogut Peter (Ukraine)

Komada Paweł (Poland)

Krstić Dragana (Serbia)

Krulikovsky Boris (Ukraine)

Kubik Józef (Poland)

Lytvynenko Volodymyr (Ukraine)

Lyashko Serhiy (Ukraine)

Mazurek Paweł (Poland)

Nakonechnyi Oleksandr (Ukraine)

Nagaraja Shishir (Great Britain)

Pasichnyk Volodymyr (Ukraine)

Patalas-Maliszewska Justyna (Poland)

Rich C. Lee (Taiwan)

Rojek Izabela (Poland)

Sabziev Elkhan (Azerbaijan)

Savina Natalia (Ukraine)

Tadeev Petro (Ukraine)

Trofimchuk Oleksandr (Ukraine)

Turbal Yurii (Ukraine)

Fedorchuk Volodymyr (Ukraine)

Cieszko Mieczysław (Poland)

Cherlinka Vasyl (Slovakia)

Chachanidze Guram (Georgia)

Chertov Oleg (Ukraine)

Shakhovska Natalia (Ukraine)

ORGANIZING COMMITTEE OF CONFERENCE

Safonyk Andrii, Martyniuk Petro, Boichura Mykhailo, Voloshchuk Volodymyr, Joshi Olena, Zhukovskyi Viktor, Zhukovska Nataliia, Michuta Olha, Nazaruk Vitalii, Pinchuk Oleg, Prysiashniuk Olena, Pryshchepa Oksana, Turbal Yurii, Ulianchuk-Martyniuk Oksana, Khrystiuk Andrii

Responsible for release: **Andrii Safonyk**

Prepared for publication: **Nataliia Zhukovska**

Conference materials have been reviewed and accepted for publication by the Academic Council of the National University of Water and Environmental Engineering on October 27, 2023, Academic Council Meeting Minutes #10.

Modeling, control and information technologies : materials of V International scientific and practical conference. [Electronic edition]. – Rivne : National University of Water and Environmental Engineering, 2023. – 297 p.

ISBN 978-966-327-578-9

© National University of Water and Environmental Engineering, 2023



МАТЕМАТИЧНЕ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

Aida-zade Kamil, Ashrafova Yegana. Optimization of source parameters in dynamic network structure objects.....	12
Aida-zade Kamil, Guliyev Samir. On the Rod Heating Problem by Sources on the Class of Zonal Controls Using the Current and Past State at Measurement Points	15
Bakuridze Mzevinar, Bakuridze Aleksander, Japaridze Khatia. Some approximate properties of Cesaro means Fourier series	19
Bayramov Azad, Suleymanov Samir. Artificial Intelligence Application for Unmanned Aerial Vehicle Navigation	21
Boiko Mykhailo, Belozerova Olena. Calibration of Dobson model for improving soil moisture retrievals from AMSR satellite imagery.....	25
Degtyariov Kyryl, Strelnikova Elena, Sierikova Olena. Computer Modeling Wind Turbine Blades with Optimal Parameter	29
Didmanidze Ibraim, Motscobili Ia, Didmanidze Manana, Zakaradze Zurab. Unemployment and Problems of Employment in an Economically Less Active	33
Gorodetskyi Viktor, Osadchuk Mykola. Methods for simplifying mathematical models of dynamical systems.....	35
Hasanov Arif H., Pashayev Adalat B., Sabziev Elkhan N. On the problems of determining the trajectory of an aerial vehicle based on inertial navigation system data.....	38
Hasanov Arif, Hashimov Elshan, Zulfugarov Bakir. Comparative analysis of the efficiency of various energy storages	42
Hashimov E.G., Khudeynatov E. K. V-Model for Air Defense Systems.....	46
Hashimov E. G., Maharramov R. R., Sabziyev E. N., Pashaev A. B. Evaluation of the dead zone of radar stations	50
Hashimov Elshan, Sabziev Elkhan, Muradov Samad. Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons	54
Huseynov Mugabil, Hashimov Elshan. Imaginary Intelligence Via Satellites.....	57
Ivohin E.V., Rets V.O., Adzhubey L.T. About approach to solution of the traveling salesman problem based on the annealing method with the fuzziness of the time perception	61
Karatayeva Tetyana, Koshmanenko Volodymyr, Satur Oksana. Equilibrium state as a compromise in the struggle of opponents	65
Klyushin Dmitriy, Lyashko Sergey, Lyashko Natalia, Tymoshenko Andrii. Optimal Control of the Position of Moisture Transfer Sources in Porous Media.....	67

Kolesnykov Valerii. Richards-Klute Equation on Graphs.....	70
Kovtunets Volodymyr, Polishchuk Nadiia. Is Cronbach’s alpha relevant indicator for quality of educational measurements?.....	73
Poliakov V. Modeling of nonlinear clarification of aqueous suspensions at rapid filters.....	75
Pryshchepa Oksana. On Stationary Probabilities of State-Dependent Markov Retrial Queue.....	78
Romanchuk Zoriana, Kiselov Oleksandr, Hladun Sofiia, Bun Rostyslav, Yashchun Orysia, Kharyton Sofiia. Spatial analysis of carbon dioxide emission processes from cement production and iron and steel production in Ukraine	80
Sabziev Elkhan, Alizada Tahir, Heydarov Namig. Improving the Efficiency of the MPU-6050 Sensor Module for Inertial Drone Navigation.....	83
Sabziev Elkhan, Nabadova Lamiya. Minimizing the time for UAV to reach a moving target.....	87
Sandrakov Gennadiy. Computational Fluid Mechanics with Phase Transitions by Particle Methods	90
Shostak Liubov, Stepanchenko Olha, Martyniuk Petro, Belozeroва Olena. Mathematical and computer models for predicting greenhouse gas emissions from soil into the atmosphere: review and comparison	92
Turbal Yurii, Turbal Mariana, Bomba Andrii. Modeling of the solitary waves trajectories in “shallow water” environments	96
Yashchun Orysia, Kharyton Sofiia, Romanchuk Zoriana, Bun Rostyslav, Hladun Sofiia, Kiselov Oleksandr. Spatial analysis of methane emissions from swine enteric fermentation in Ukraine	102
Zaiats Vasyl. Features of Using Models Pspice Software	104
Анікушин Андрій, Андарал Анастасія. Узагальнена розв’язність псевдопараболічних інтегро-диференціальних рівнянь.....	108
Бігун Ярослав, Скутар Ігор. Усереднення в узагальненій багаточастотній системі із запізненням.....	110
Бомба Андрій, Каштан Сергій. Системна методологія моделювання фільтраційних і гідравлічних процесів: ідентифікація кривих розділу сильно контрастних неоднорідно анізотропних середовищ методами комплексного аналізу	112
Гальченко Володимир, Трембовецька Руслана, Тичков Володимир, Тичкова Наталія. Уточнене комп’ютерне моделювання процесу вимірювального контролю у вихрострумівій структуроскопії на основі врахування апіорної інформації про найвпливовіші фактори щодо об’єктів	114
Довгий Станіслав, Буланчук Олег, Буланчук Галина. Моделювання прориву греблі методом гідродинаміки згладжених частинок.....	116
Івохін Е.В., Гавриленко В.В., Івохіна К.Є. Про один алгоритм розв’язання задачі комівояжера на основі методу оптимізації потоків даних.....	118

Косович Ігор. Ефективність стратегій в боротьбі з епідемією.....	121
Красиленко Володимир, Чіков Ілля, Нікітович Діана. Моделювання багатопортової гетероасоціативної пам'яті (БГАП) на основі еквівалентністних моделей, що реалізуються на векторно-матричних перемножувачах	123
Попов Вячеслав, Тригуб Олександр, Мілейковський Віктор. Моделювання надшвидкого аварійного охолодження стінки корпусу реактора ВВЕР-1000	129
Приймак Микола. Ортогональна система тригонометричних функцій із змінним періодом та деякі її властивості	132
Приймак Микола. Оцінка варіабельності серцевого ритму на основі періодичних функцій із змінним періодом	135
Пукач Петро, Чернуха Юрій. Комп'ютерне моделювання дифузії домішкової речовини з випадкового точкового джерела маси	139
Савицький Олег. Моделювання вимушених гармонічних коливань прямокутного фундаменту на водонасиченій шаруватій основі	144
Сафоник Андрій, Полюхович Олена. Про систему керування анаеробним біореактором для ефективною очистки стічних вод	148
Сафоник Андрій, Полюхович Сергій. Розроблення моделі процесу анаеробного очищення стічних вод.....	150
Сохацький Анатолій. До числового моделювання обтікання транспортних апаратів турбулентним потоком	152
Трофимчук Олександр, Шокарев Андрій, Заболотний Сергій, Калюх Юрій. Інформаційна система для ліквідації наднормативних кренів будівель та споруд	156
Федорчук Володимир, Іванюк Віталій. Моделювання одновимірних нелінійних об'єктів з розподіленими параметрами на основі використання оборотних simulink моделей.....	157
Харьков Олег, Семенов Володимир. Швидкість збіжності нових алгоритмів для варіаційних нерівностей.....	159
Чернуха Ольга, Білушак Юрій, Білушак Галина. Процеси перенесення в шарі за лінійної регресійної моделі на нижній границі.....	161

ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Boichura Mykhailo, Lopatina Diana. Web application for organizing bilingual presentations	166
Hasanova Samira A. An algorithm for soil identification according to the World Reference Base for Soil Resources.....	168
Hladka O., Karpovich I., Opanasiuk M. Cross-platform application for NFT	

tokens.....	172
Joshi Olena, Joshi Artur. Conceptual model of the information system for the automation of personalized email distribution	175
Kruk Roman, Zhukovska Nataliia. Requirements engineering issues and challenges in Ukrainian agile-projects	177
Vychuzhanin Alexey. Intelligent decision support system for assessing the risk of failures of complex technical systems.....	181
Zyma Arsenii, Berest Oleh. Analysis of the problem of monitoring the concentration of Carbon Dioxide in Smart Home. Methods for measuring Carbon Dioxide	184
Кіцера Антон, Сечко Олексій, Кочан Роман. Карта відображення повітряної обстановки розподіленої акустичної системи виявлення та супроводження літальних апаратів	186
Палка Олег, Дмитроца Леся. Використання інформаційних дашбордів у розумних містах.....	189
Парашенко Владислав, Берест Олег. Система підтримки прийняття рішень для верифікації якості коду прикладного програмного забезпечення.....	192
Шпортко Олександр, Бомба Андрій. Формування колірних моделей з центруванням інтервалів різниць компонентів в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат.....	194

ГІДРОІНФОРМАТИКА ТА УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ

Dmytro Stefanyshyn. A Design Water Discharge Maxima Forecasting Method Based on Observation Data Using Plotting Position Formulas.....	199
Ostroverkh Boris, Potapenko Lyudmila. Application of geoinformation technology methods for researching the morphodynamics of river and coastal processes.....	203
Sierikova Olena, Strelnikova Elena, Degtyariov Kyryl. Underground Water Resources Management for Flooding Prevention	207
Волк Любов, Безусяк Олександр. Коефіцієнт гідравлічного опору в трубах з однорідною зернистою шорсткістю	210
Волк Павло, Рокочинський Анатолій, Коптюк Роман, Ромащенко Євген. Упровадження сучасних комп'ютерних та високо інформаційних технологій у проекти водогосподарсько-меліоративних об'єктів	212
Клімов Сергій, Козішкурт Світлана. Дистанційне зондування Землі для оцінки ризиків втрати родючості сухостепових ґрунтів при водній кризі	214
Сафоник Андрій, Полюхович Сергій, Ластовецький Дмитро. Інноваційні підходи до керування та моніторингу систем біологічного очищення стічних вод	218

Турченко Василь, Рокочинський Анатолій, Приходько Наталія, Волк Павло, Тимейчук Орест. Економіко-математичне моделювання динамічних процесів при запровадженні проектних рішень на Придунайських рисових системах.....	221
Хлапук Микола, Філіпович Юрій, Стельмах Назарій. Тенденції розвитку гідроакumuлюючої енергетики у світі	224

ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IoT) ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ

Pavliuk Vitalii, Drevetskyi Volodymyr. Determining job category using AWS machine learning cloud services.....	227
Skurzhanyskyi Oleksandr. Distillation of Large Language Models for Text Simplification	230
Stepanets Oleksandr, Zakharchenko Anastasia. Orchestration Of Model Computing Assets For The Development Of Digital Twins	232
Головецький Петро. Валідація процесу куріння за допомогою комп'ютерного бачення	236
Павелко Олександр, Куликовська Наталія, Тіменко Артур. Автоматизована система моніторингу якості повітря.....	238
Поляков Владислав. Програмування стану механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда	242
Сафоник Андрій, Данченков Владислав. Оптимізація процесу отримання коагулянту засобами машинного навчання	245
Сечко Олексій, Кіцера Антон, Кочан Роман. Розпізнавання безпілотних літальних апаратів типу Shahed-136 по акустичній сигнатурі.....	248

РОБОТОТЕХНІКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КЕРУВАННЯ

Mariash Yurii, Stepanets Oleksandr. Implementation of model predictive control in a programmable logic controller	253
Shepel Oleksandr, Matsui Anatolii. Method of automatic fault location in 6-35 kV electrical networks.....	257
Воробель Роман, Берегуляк Олена, Івасенко Ірина, Мандзій Теодор. Степенеve підсилення локальних контрастів зображення	259
Гаврилюк Олександр, Реут Дмитро, Аврука Ірина. Побудова локальної карти прохідності навчальним роботом з ультразвуковим сенсором HC-SR04	263
Клепач Микола, Филипчук Леонід, Клепач Марко. Аналіз цифрової системи пов'язаного регулювання параметрів рН та Eh металовмісних стоків промислових виробництв	265
Шалева Володимир, Матіко Федір, Качор Олег. Аналіз технологічних ліній	

дозування лікарських препаратів як об'єкта керування 268

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

Барановський Сергій, Бомба Андрій. Проблеми ідентифікації параметрів моделей інфекційного захворювання в умовах дифузійного збурення 272

Марценюк Василь, Андрейчин Михайло, Сверстюк Андрій, Багрій-Заяць Оксана, Паничев Володимир, Никитюк Світлана. Підхід до прогнозування поширення COVID-19 у Тернопільській області 276

РОЗУМНІ МЕРЕЖІ ТА РОЗУМНІ СПОЖИВАЧІ

Василюк С.В., Василюк К.С., Ільчук В.В. Підтримання балансу шахтних вод поствугільних регіонів за рахунок фотоелектричної генерації 280

Чубай Назарій, Аврука Ірина. Роль та перспективи впровадження розумної енергосистеми Smart Grid в сучасному світі 282

КІБЕРНЕТИЧНА ТА ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКИ

Beridze Besik, Didmanidze Ibraim, Donadze Mikheil, Zaslavsky Vladimir. Criteria of reliability of computer networks and assessment quality of service 287

Yevhenii Voievodin, Inna Rozlomii, Andrii Yarmilko. Approach to Evaluate Scheduling Strategies in Container Orchestration Systems 292



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

Optimization of source parameters in dynamic network structure objects

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.001>

Aida-zade Kamil,
Institute of control systems,
Laboratory of recognition, identification and methods of
optimal solutions
Baku, Azerbaijan
kamil_aydazade@rambler.ru

Ashrafova Yegana,
Baku State University
Department of Informatics
Institute of Control Systems
Laboratory of recognition, identification and methods of
optimal solutions
Baku, Azerbaijan
ashrafova.yegana@gmail.com

Abstract—The optimization of parameters for concentrated sources that influence the operation of a dynamic network structure is the focus of this study. The network structure comprises numerous one-dimensional objects, each governed by a system of ordinary differential equations with nonlocal boundary conditions to describe their states. Sources affect individual points within these subobjects, as well as their connection points. The optimization process aims to determine the optimal locations and power levels of these sources, based on predefined target functionality criteria. We derive the necessary optimality conditions for the concentrated sources' parameters and present the results of numerical experiments using a test problem as an illustrative example.

Keywords—sources; placement of sources; non-local conditions; optimality conditions; functional gradient.

I. INTRODUCTION

The optimization problem involving the placement and power allocation of concentrated sources [1 – 4] that impact the performance of a complex system has been thoroughly investigated. This system comprises numerous one-dimensional components, each characterized by a set of ordinary differential equations with nonlocal boundary conditions. These components are interconnected in arbitrary sequences, relying solely on the states at their respective starting and ending points.

We refer to such complex objects as dynamic objects with a network structure, drawing an analogy to [5], and the corresponding mathematical models as network models. These objects are conveniently represented as directed graphs. It is important to note that these graphs are typically incomplete, with most of the elements in the connection matrix set to zero. Non-zero elements in this matrix indicate connections between the initial and final states of individual blocks corresponding to adjacent links in the graph. The problem under consideration encompasses various challenges, notably including the optimal control of transient processes in the unsteady flow of liquids or gases within complex pipeline networks [2, 3]. The mathematical models governing these processes consist of subsystems of hyperbolic partial differential equations, each describing

fluid movement within a distinct section of the pipeline. At the junctions between these sections, continuity of flow and material balance conditions are upheld, resulting in nonlocal boundary conditions. The application of the method of characteristics in either time or spatial variables (analogous to the decomposition method) transforms the problem of controlling material flow within the transportation network into the problem addressed in this article.

II. STATEMENT OF THE PROBLEM

We consider a complex object consisting of m links (blocks), randomly connected by their ends, the structure of which is conveniently represented in the form of a directed graph.

The set of all vertices of the graph will be denoted by I , and the set of links (k, s) of length l^{ks} with a beginning at the vertex $k \in I$ and an end at the vertex $s \in I$ will be denoted by $J = \{(k, s) : k, s \in I\}$, $|I| = N$, $|J| = m$, $|I|$ indicates the number of elements of the set I .

Let the sets of links $J_i^+ = \{(j, i) : j \in I_i^+\}$, $J_i^- = \{(i, j) : j \in I_i^-\}$ – respectively entering and leaving the i th vertex, I_i^+ and I_i^- – the sets of vertices adjacent to the i th vertex, which are respectively the ends and beginnings of links from the set J , $J_i = J_i^+ \cup J_i^-$, $I_i = I_i^+ \cup I_i^-$. Let us denote

$|J_i^+| = |I_i^+| = \bar{n}_i$, $|J_i^-| = |I_i^-| = \underline{n}_i$, $\bar{n}_i + \underline{n}_i = n_i$, $i \in I$. It's clear that

$$\sum_{i \in I} \underline{n}_i = \sum_{i \in I} \bar{n}_i = m, \quad \sum_{i \in I} n_i = 2m.$$

In practical applications, as a rule, the relation $n_i \ll N$, $i \in I$, holds, i.e. the number of vertices adjacent to any vertex is much less than the total number of vertices.

Each link in the graph is associated with an independent subobject (block). Let the state of each of

the links $(k,i) \in J$, $k \in I_i^+$, $i \in I$ be described by a system of \aleph linear nonautonomous ordinary differential equations

$$\begin{aligned} \frac{du^{ki}(x)}{dx} &= A^{ki}(x)u^{ki}(x) + \\ &+ B^{ki}w^{ki}\delta(x-\xi^{ki}) + f^{ki}(x), \end{aligned} \quad (1)$$

$$x \in (0, l^{ki}),$$

with M_i , $M_i \leq n_i \cdot \aleph$, linearly independent boundary conditions specified in undivided form

$$\begin{aligned} \sum_{k \in I_i^-} g_j^{ik} u^{ik}(0) + \sum_{k \in I_i^+} q_j^{ki} u^{ki}(l^{ki}) &= v_j^i, \\ j &= \overline{1, M_i}, \quad i \in I. \end{aligned} \quad (2)$$

Here functions $u^{ki}(x) = u^{ki}(x; \nu) \in \mathbb{R}^{\aleph}$ characterizes the state of the (k,i) th link with length l^{ki} at the point $x \in [0, l^{ki}]$; $\nu = (w, v, \xi)$ – vector of parameters to be optimized, whose parameters are $w \in \mathbb{R}^\mu$, $w = (w^{ki} = (w_1^{ki}, \dots, w_{\mu_{ki}}^{ki}) \in \Omega_{w^{ki}} \subset \mathbb{R}^{\mu_{ki}} : k \in I_i^+, i \in I)$, w_j^{ki} – j -th component μ_{ki} -dimensional (k,i) -th external source acting on the (k,i) th subsystem at the point $\xi^{ki} \in \Omega_{\xi^{ki}} \equiv [0, l^{ki}]$, $\xi = (\xi^{ki} : k \in I_i^+, i \in I)$, $\xi \in \mathbb{R}^{\bar{m}}$, $\bar{m} \leq m$; $v \in \mathbb{R}^M$, $v = (v^i \in \Omega_{v^i} \subset \mathbb{R}^{M_i}, i \in I)$, $v^i = (v_1^i, \dots, v_{M_i}^i)^\top$, v_j^i – j -th component of the external source acting on the i th vertex. Let's denote $\mu = \sum_{i \in I} \sum_{k \in I_i^-} \mu_{ki}$, $M = \sum_{i=1}^N M_i$.

The given in the problem are: $A^{ki}(x) \neq \text{const}$, $f^{ki}(x)$ – respectively \aleph -dimensional square matrix and vector continuous at $x \in [0, l^{ki}]$ functions; B^{ki} – $(\aleph \times \mu_{ki})$ -dimensional scalar matrices; row vectors $g_j^{ik_s} = (g_{j,1}^{ik_s}, \dots, g_{j,\aleph}^{ik_s})$, $k_s \in I_i^-$, $s = \overline{1, n_i}$, $q_j^{k,i} = (q_{j,1}^{k,i}, \dots, q_{j,\aleph}^{k,i})$, $k_s \in I_i^+$, $s = \overline{1, \bar{n}_i}$, $j = \overline{1, M_i}$, $i \in I$. If $B^{ki} = 0_{\aleph \times \mu_{ki}}$, then this means that there are no sources in the (k,i) -th section.

In practical problems, depending on the sign of the source parameters w^{ki} , $k \in I_i^+$, $i \in I$, the external source at a point ξ^{ki} is called “outflow” or “inflow”.

The total number of subsystems in equation (2.1) is equal to the number of links m in the network, each of which connects to adjacent links (blocks) in an arbitrary order solely through non-separated (nonlocal) boundary conditions, as described in equation (2.2). The total number of differential equations in system (2.1) is equal to $m\aleph$, and the number of boundary conditions in equation (2.2) should also be equal to M , ensuring compatibility between equations: $M = m\aleph$.

We will assume that the boundary value problem (1), (2) has a unique solution. This, as is known [9], depends

only on matrices $A^{ki}(x)$, $k \in I_i^+$, vectors $g_j^{ik_s}$, $k_s \in I_i^-$, $s = \overline{1, n_i}$, $q_j^{k,i}$, $k_s \in I_i^+$, $s = \overline{1, \bar{n}_i}$, $j = \overline{1, M_i}$, $i \in I$, and does not depend on other data involved in the problem, in particular, on unknown vectors w, v, ξ .

Based on practical considerations, restrictions are imposed on the values of the parameters w^{ki} , ξ^{ki} , v^i , $k \in I_i^+$, $i \in I$, optimized in the problem:

$$\begin{aligned} w^{ki} &\in \Omega_{w^{ki}}, \quad v^i \in \Omega_{v^i}, \quad \xi^{ki} \in \Omega_{\xi^{ki}} \equiv [0; l^{ki}], \\ \Omega^{ki} &= \Omega_{w^{ki}} \times \Omega_{v^i} \times \Omega_{\xi^{ki}}. \end{aligned} \quad (3)$$

We will assume that the sets of admissible values $\Omega_{w^{ki}}$, Ω_{v^i} are convex and compact. It is required to find such values of the vector components $\nu = (w, v, \xi)$ for which the functional

$$\begin{aligned} \mathfrak{J}(w, v, \xi) &= \sum_{i \in I} \sum_{k \in I_i^+} \int_0^{l^{ki}} \|u^{ki}(x) - U^{ki}(x)\|_{\mathbb{R}^{\aleph}}^2 dx + \\ &+ \square(w, v, \xi), \\ \square(w, v, \xi) &= \varepsilon_1 \sum_{i \in I} \sum_{k \in I_i^+} \|w^{ki} - \hat{w}^{ki}\|_{\mathbb{R}^{\mu_{ki}}}^2 + \\ &+ \varepsilon_2 \sum_{i \in I} \|v^i - \hat{v}^i\|_{\mathbb{R}^{M_i}}^2 + \varepsilon_3 \sum_{i \in I} \sum_{k \in I_i^+} \|\xi^{ki} - \hat{\xi}^{ki}\|_{\mathbb{R}^{m_i}}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

gets the minimum value.

The optimized finite-dimensional vector (w, ξ, v) , which determines the parameters and locations of external sources, in real problems has a small dimension, despite the large dimension of the system of differential equations (2.1) itself.

III. METHODS AND RESULTS OF THE STUDY

The convexity and differentiability of the functional (2.5) are studied, formulas for the gradient of the functional are obtained, and the necessary conditions for optimality with respect to the parameters to be optimized are formulated.

Theorem 1. Let all the conditions imposed on the functions and parameters involved in the problem (1) – (4) be satisfied. The functional $\mathfrak{J}(w, v, \xi)$ is convex in w, v , for a fixed admissible vector ξ .

It is easy to prove that the functional $\mathfrak{J}(w, v, \xi)$ is not convex on ξ if the condition $B^{ki}w^{ki} \neq 0$ is satisfied for at least one section $(k,i) \in J$, i.e. there are links that are influenced by external sources.

The differentiability of the functional (4) and the formulas obtained in the work for the components of its gradient over the optimized triple $\nu = (w, v, \xi)$ are investigated. Necessary optimality conditions are formulated in variational form for problem (1) – (4).

In many practical applications, external sources do not participate at all links and vertices of the object. In particular, on some links or vertices their values may be set and not optimized. In these cases, the corresponding components of the gradients of the functional $\text{grad}_w \mathfrak{J}(w, v, \xi)$, $\text{grad}_v \mathfrak{J}(w, v, \xi)$, $\text{grad}_\xi \mathfrak{J}(w, v, \xi)$ are not calculated and are taken equal to zero.

To determine the optimal values of $\mathbf{w} = (w, v, \dots)$, using formulas for calculating the gradient components of the functional of the problem (1) – (4), one can use effective first-order optimization methods, for example, the gradient projection method [6].

IV. CONCLUSION

The optimization problem for a network structure is examined, which is characterized by a system of differential equations featuring large ordinary derivatives and nonlocal boundary conditions. It is demonstrated that the conjugate problem shares the same characteristics as the direct problem. Furthermore, the expressions for the gradient components of the functional, based on source parameters, incorporate values of both direct and adjoint variables. These variables are exclusively defined at their respective vertices and blocks.

REFERENCES

- [1] K. R. Aida-zade, and Y. R. Ashrafova. Optimal Control of Sources on Some Classes of Functions. *Optimization: A Journal of Mathematical Programming and Operations Research*. 2014. Vol. 63(7). Pp. 1135–1152.
- [2] K. R. Aida-zade, and E. R. Ashrafova. Numerical Solution to the Problem of Determination of Places and Volume of the Fluid Leakage under Non-stationary Regimes in a Pipeline Network. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2017. Vol. 57(12). Pp. 1919–1934.
- [3] Z. S. Kapelan, D. A. Savic, and G. A. Walters. A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks. *J. Hydraulic Res.* 2003. Vol. 41(5). Pp. 481–492.
- [4] K. R. Aida-zade, and A. H. Bagirov. On the Problem of Placement of Oil Wells and Control of Their Flow-rates. *Autom. Remote Control*. 2006. Vol. 1. Pp. 52–61.
- [5] K. R. Aida-zade. Investigation of Non-Linear Optimization Problems of Networks Structure. *Autom. Remote Control*. 1990. Vol. 51(2). Pp. 135–145.
- [6] Z. Guanghui, N. Qin, and Z. Meilan. A scaled conjugate gradient method with moving asymptotes for unconstrained optimization problems. *Journal of Industrial and Management Optimization*. 2017. Vol. 13(2). Pp. 595–608. Doi: 10.3934/jimo.2016034

On the Rod Heating Problem by Sources on the Class of Zonal Controls Using the Current and Past State at Measurement Points

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.002>

Kamil Aida-zade¹

¹Laboratory of recognition, identification and methods of optimal solutions
Institute of Control Systems of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan
Baku, Azerbaijan
kamil_aydazade@rambler.ru

Samir Guliyev^{1,2}

²Department of general and applied mathematics
Azerbaijan State Oil and Industry University
Baku, Azerbaijan
azcopal@gmail.com

Abstract—We study an optimal feedback control problem for the rod heating process by means of lumped sources. The control actions are the powers of the sources, the values of which are defined on the class of zonal controls. The values of the parameters of zonal control actions are determined by subsets of the state space, to which belong the values of the process state at the measurement points at the current and past time moments. The posed problem is reduced to a parametric optimal control problem on determining a finite-dimensional vector of values of the parameters of zonal control actions. We have obtained optimality conditions for the values of the parameters of zonal control actions. These conditions contain formulas for the gradient of the objective functional with respect to the optimizable parameters. They make it possible to solve the reduced problem numerically with the application of efficient first-order optimization methods.

Keywords—feedback control; zonal control; distributed parameters system; heat conduction process; gradient of functional.

I. INTRODUCTION

It is known that one of the important areas in the modern automatic control theory is the theory of control of systems with distributed parameters. The synthesis problems for distributed control systems are, in most cases, more complex than lumped systems due to the characteristics of distributed objects. Distributed control objects include, for example, chemical-technological, radiation, aerodynamic, and hydrodynamic processes, heat conduction and diffusion processes, processes associated with the movement of elastic structures, etc. The absence of a formalized methodological approach for solving problems of controlling objects with distributed parameters poses certain problems for researchers, which requires using non-standard research methods and decision-making in each specific case. Modern technical means of measuring and computing technology, which make it possible to carry out a large amount of measuring and computational work in real-time, have played a key role in the development of feedback control systems and their widespread practical implementation.

The paper considers the feedback control problem for the distributed parameters object on special classes of control actions. For synthesized controls, the concept of zonality is introduced, which means the constancy of the values of the synthesized control parameters in each of the subsets (zones), into which the entire set of possible states of the object is divided. The values of the control actions are determined by the type of feedback and the class of the functional dependence of the control on the observed value of the state. The constancy of the parameters of zonal control actions determines the robustness of the control system, as well as ensures the feasibility of synthesized control actions with sufficiently high accuracy and improves the technical performance of the equipment involved in the control loop.

We have used the principle of zonality of control parameters as the basis of numerical techniques for solving such specific optimization and inverse problems like the problem of optimal placement of production and injection wells and optimal control of their flow rates during the operation of an oil reservoir under the regime of water-driven piston displacement [1], the problem of identifying the hydraulic resistance coefficient under the unsteady flow of viscous fluids through pipelines [2], and problems of feedback control and identification of objects with lumped parameters [3–7].

II. PROBLEM STATEMENT

To illustrate the proposed approach, we consider the problem of controlling a rod heating process by means of lumped sources. This process can be described by the following parabolic type partial differential equation:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \sum_{k=1}^{\ell} v_k(t) \delta(x - \xi_k) + \beta[u(x, t) - \gamma], \quad (1)$$

where $x \in (0, 1)$, $t \in (0, T]$, $u(x, t)$ is the temperature of the rod at the point $x \in [0, 1]$ at the moment of time $t \in [0, T]$; $\xi_k \in (0, 1)$ the given locations of heat sources with optimizable powers $v_k(t)$, $k = 1, 2, \dots, \ell$; ℓ the number of heat sources; $\delta(\cdot)$ the one-dimensional generalized Dirac's delta function; α the thermal

diffusivity coefficient; β the heat transfer coefficient. Initial and boundary conditions are given in the following form:

$$u(x, 0) = \varphi = \text{const}, \quad x \in (0, 1), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial u(1, t)}{\partial x} = 0, \quad t \in [0, T], \quad (3)$$

respectively. Note that the initial temperature φ , constant along the entire length of the rod, is not known exactly but there is given the set Φ of all possible values of the initial temperatures of the rod with a density function $\rho_\Phi(\varphi)$ such that

$$\rho_\Phi(\varphi) \geq 0, \quad \int_\Phi \rho_\Phi(\varphi) d\varphi = 1. \quad (4)$$

The same is true concerning the parameter γ , the ambient temperature, whose exact values are not known but there is the set Γ of its possible values and the corresponding density function:

$$\rho_\Gamma(\gamma) \geq 0, \quad \int_\Gamma \rho_\Gamma(\gamma) d\gamma = 1. \quad (5)$$

Assume that thermal sensors are installed at L points of the rod with coordinates x_i , $i = 1, 2, \dots, L$. These sensors are used to conduct operative observation and input to the control system of information on the state of the heating process at these points continuously in time:

$$\bar{u}(t) = (\bar{u}_1(t), \dots, \bar{u}_L(t)) = (u(x_1, t), \dots, u(x_L, t)), \quad (6)$$

or at discrete points in time:

$$\bar{u}(t_j) = (\bar{u}_1(t_j), \dots, \bar{u}_L(t_j)) = (u(x_1, t_j), \dots, u(x_L, t_j)), \quad (7)$$

for $j = 0, 1, 2, \dots, N$. Based on technological conditions, we have to impose certain constraints on the values that the control actions can take:

$$U_k = \{v_k(t) : v_k^{\min} \leq v_k(t) \leq v_k^{\max}, k = 1, 2, \dots, \ell\}, \quad (8)$$

$$U = (U_1, U_2, \dots, U_\ell),$$

where v_k^{\min} and v_k^{\max} are prescribed values and U_k represents the set of admissible values of the control $v_k(t)$. Let the phase state values of the rod satisfy the inequalities:

$$u_{\min} \leq u(x, t) \leq u_{\max}, \quad x \in (0, 1), t \in [0, T],$$

under all possible admissible values of the controls $v_k(t)$, $k = 1, 2, \dots, \ell$, as well as initial conditions $\varphi \in \Phi$, boundary conditions (3), and ambient temperatures $\gamma \in \Gamma$. We divide the segment $[u_{\min}, u_{\max}]$ by the points ω_s , $s = 0, 1, \dots, M$, such that $\omega_0 = u_{\min}$, $\omega_M = u_{\max}$, and $\omega_{s-1} < \omega_s$, into semi-intervals $[\omega_{s-1}, \omega_s)$, $s = 1, 2, \dots, M$. In the phase space of temperature values measured at the points x_i , $i = 1, 2, \dots, L$, of the rod at the current time t

and some past time $t - \Delta$, we introduce L -dimensional parallelepipeds (so-called zones) as follows:

$$P_{i_1, i_2, \dots, i_L}^1 = \left\{ (\bar{u}_1(t), \dots, \bar{u}_L(t)) : \omega_{i_s-1} \leq u(x_s, t) \leq \omega_{i_s} \right\},$$

$$P_{j_1, j_2, \dots, j_L}^2 = \left\{ (\bar{u}_1(t - \Delta), \dots, \bar{u}_L(t - \Delta)) : \omega_{j_s-1} \leq u(x_s, t - \Delta) \leq \omega_{j_s} \right\}, \quad (9)$$

$$i_s, j_s \in \{1, 2, \dots, M\}, s = 1, 2, \dots, L, P = (P_{i_1, \dots, i_L}^1, P_{j_1, \dots, j_L}^2),$$

where $I = (i_1, i_2, \dots, i_L; j_1, j_2, \dots, j_L)$ denotes the $2L$ -dimensional multi-index, which indicates the number of the corresponding parallelepiped. The feedback control problem for the rod heating process consists in finding admissible values of the sources' powers as functions of the object's state:

$$v_k(t) = v_k(\bar{u}(t), \bar{u}(t - \Delta)), v_k(t) \in U_k, k = 1, 2, \dots, \ell,$$

at the observable points of the rod in order to minimize an objective functional. The source functions $v_k(t)$ are assumed to be piecewise constant. The values of each control $v_k(t)$, constant for the whole time duration $[t_l, t_{l+1})$, are determined depending on the last measured value of the observation vector over the object's state $(\bar{u}(t), \bar{u}(t - \Delta))$; namely, depending on the number (multi-index) of the parallelepiped (9), to which the last measured (observed) object's state $(\bar{u}(t), \bar{u}(t - \Delta))$ belongs. Thus, to each phase parallelepiped (9), there corresponds its constant control value, i.e.,

$$v_k(t) = \mathcal{G}_l^k = \text{const}, (\bar{u}(t), \bar{u}(t - \Delta)) \in P_l, \quad (10)$$

$$t \in [t_l, t_{l+1}), l = 0, 1, 2, \dots, N - 1, k = 1, 2, \dots, \ell.$$

In case the observed object's state belongs to the border of any zones, we use the value of the zonal control of that adjacent zone into which the phase trajectory has passed. The number of different values that each source's power can take is equal to the number of phase parallelepipeds, i.e., M^{2L} . It is clear that the controls of kind (10) assume feedback. In the case of (10), the values of the controllable sources' powers during the rod heating process change only at the moments when the population of states at the observable points proceeds from one phase parallelepiped to another. To control the heat conduction process in the rod, it is required to synthesize a regulator that, based on the results of temperature measurements at the points x_i , $i = 1, 2, \dots, L$, of the rod, would ensure the maintenance of the temperature $u(x, T)$ at a specified level by maintaining the required temperature $v_k(t)$, $k = 1, 2, \dots, \ell$, in the heat sources. In the case of non-fixed initial conditions and ambient temperature, the objective functional takes on the following form:

$$\begin{aligned}
 F(\mathcal{G}) &= \int_{\Phi} \int_{\Gamma} G(\mathcal{G}; \varphi, \gamma) \rho_{\Gamma}(\gamma) \rho_{\Phi}(\varphi) d\gamma d\varphi, \\
 G(\mathcal{G}; \varphi, \gamma) &= \int_0^1 w(x) \left[u(x, T; \mathcal{G}, \varphi, \gamma) - u^*(x) \right]^2 dx, \quad (11) \\
 \mathcal{G} &= \left(\mathcal{G}_1^1, \dots, \mathcal{G}_{M^{2L}}^1; \mathcal{G}_1^2, \dots, \mathcal{G}_{M^{2L}}^2; \dots; \mathcal{G}_1^{\ell}, \dots, \mathcal{G}_{M^{2L}}^{\ell} \right),
 \end{aligned}$$

where $u(x, T; \mathcal{G}, \varphi, \gamma)$ is the solution to the initial- and boundary-value problem (1) – (3) corresponding to the initial condition $\varphi \in \Phi$, ambient temperature $\gamma \in \Gamma$, and to admissible values of the control $\mathcal{G} \in U$; $w(x)$ the weight function; and $u^*(x)$ the function characterizing the desired distribution of temperature at the final moment of the heating process. The functional (11) characterizes the quality of the control process on average over the set of all possible initial states Φ , the set of possible ambient temperatures $\gamma \in \Gamma$, and the specified boundary conditions.

Thus, the considered control problem on the class of piecewise-constant functions with the use of feedback consists of optimizing the $\ell \times M^{2L}$ -dimensional vector \mathcal{G} . The considered feedback control problem (1) – (11) is a parametric optimal control problem for a system with distributed parameters. Its specific features are, firstly, the absence of specifically prescribed initial conditions, secondly, the finite-dimensionality of the sought-for control vector, and thirdly, the control is formed depending on the values of the process state at the measurement points, and more precisely, it depends on the multi-index defining the parallelepiped (zone) of the phase space to which the measurement values belong. The solution of the feedback control problem (1) – (11) are synthesized zonal controls provided that the feedback with the object and the choice of the values of control actions is carried out only at specified discrete moments of time. As examples of practical applications of such problems, one can cite the control of many technological processes and technical objects. The organization of continuous monitoring of the state is impossible for these kinds of objects, and each observation (feedback) requires specific measures and, therefore, costs time and material.

The formulated feedback zonal controls problem (1) – (11) leads to a finite-dimensional optimization problem. For numerical solution to this problem, we propose to use the approach described in [2–7]. To solve the problem in the case of a simple design of a set of admissible controls U (for example, a parallelepiped, a hyper-sphere, a polyhedron, etc.), it is effective to use first-order numerical optimization methods such as gradient projection or conjugate gradient projection methods [8–11]. For example, for the conjugate gradient projection method, we construct a minimizing sequence $\{\mathcal{G}^k\}$ in this fashion:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{G}^{k+1} &= \text{Proj}_{(U)}(\mathcal{G}^k + \lambda_k \times d^k), \quad \lambda_k > 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \\
 d^0 &= -\nabla F(\mathcal{G}^0), \quad d^{k+1} = -\nabla F(\mathcal{G}^{k+1}) + \mu_k \times d^k, \quad (12) \\
 \mu_k &= \frac{\|\nabla F(\mathcal{G}^{k+1})\|}{\|\nabla F(\mathcal{G}^k)\|},
 \end{aligned}$$

where the index k designates the iteration number; $\mathcal{G}^0 \in \square^{\ell \times M^{2L}}$ is some initial guess to the optimizable vector; $\nabla F(\mathcal{G}^k)$ is the gradient of the objective functional; λ_k is the minimizing step size taken in the direction of d^k ; $\text{Proj}_{(U)}(\cdot)$ is the projection operator onto the admissible set U . If the domain U has a complex boundary and the projection operator onto it has no constructive character, then to solve the posed problem, one can use methods of sequential unconstrained optimization (for example, methods of internal and external penalty functions) with the use of effective methods of unconstrained optimization of the first order such as quasi-Newtonian methods [8, 9]. To construct iterative procedures based on the above optimization techniques, it is essential to have exact formulas for the gradient of the objective functional in the space of optimizable parameters. To this end, we derive formulas for the gradient of the objective functional in the space of optimizable parameters. The derivation of these formulas is based on the technique for calculating the increment of the objective functional obtained by incrementing the optimizable parameters.

In the derivation of the formula for the gradient of the objective functional, the following remark is important. The initial conditions (2), i.e., the elements of the set Φ , as well as different values of the parameter $\gamma \in \Gamma$ are independent. Then the gradient of the functional satisfies the formula:

$$\begin{aligned}
 \nabla F(\mathcal{G}) &= \nabla \int_{\Phi} \int_{\Gamma} G(\mathcal{G}; \varphi, \gamma) \rho_{\Gamma}(\gamma) \rho_{\Phi}(\varphi) d\gamma d\varphi = \\
 &= \int_{\Phi} \int_{\Gamma} \nabla G(\mathcal{G}; \varphi, \gamma) \rho_{\Gamma}(\gamma) \rho_{\Phi}(\varphi) d\gamma d\varphi.
 \end{aligned}$$

Therefore, to obtain formulas for $\nabla F(\mathcal{G})$, we obtain formulas for the gradient of $G(\mathcal{G}; \varphi, \gamma)$ with respect to individual terms φ and γ . For this purpose, we obtain the formula for the increment of the functional $G(\mathcal{G}; \varphi, \gamma)$ obtained by incrementing a single component of the optimizable vector \mathcal{G} . Generalizing the formula for the gradient of $G(\mathcal{G}; \varphi, \gamma)$ to all possible states of the initial condition and all possible values of the ambient temperature, i.e., covering the entire sets Φ and Γ , we thus prove the following theorem.

Theorem. The components of the gradient of the functional in the problem (1) – (11), in the space of piecewise constant controls (10) for an arbitrary control $\mathcal{G} \in U$ are determined by the formula: as in

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F(\mathcal{G})}{\partial \mathcal{G}_s^k} &= - \iint_{\Phi \Gamma} \left\{ \int_{\Pi, (\mathcal{G}_s^k)^0}^1 \int_0^1 \psi(x, t; \mathcal{G}, \varphi, \gamma) \delta(x - \xi_k) dx dt \right\} \cdot \\
 &\quad \cdot \rho_{\Gamma}(\gamma) \rho_{\Phi}(\varphi) d\gamma d\varphi, \quad k = 1, 2, \dots, \ell, \quad s = 1, 2, \dots, M^{2L},
 \end{aligned}$$

where $\psi(x, t; \mathcal{G}, \varphi, \gamma)$ is the solution of the following adjoint problem, corresponding to the current zonal control:

$$\beta \psi(x, t) - \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} = 0, x \in (0, 1), t \in [0, T]$$

$$\psi(x, T) = -2w(x) [u(x, T) - u^*(x)], x \in [0, 1]$$

$$\frac{\partial \psi(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial \psi(1, t)}{\partial x} = 0, t \in [0, T].$$

Here $\Pi_I(\mathfrak{G}_s) = \bigcup_{(\bar{u}(t_j), \bar{u}(t_j - \Delta)) \in \mathfrak{F}_I} [t_j, t_{j+1})$ is the combined disparate time intervals, during which the object's state at the observable points belongs to the same zone, that is, when the vector $(\bar{u}(t_j), \bar{u}(t_j - \Delta))$ belongs to the I^{th} phase parallelepiped. Note that the trajectory of the system may enter and leave the same zone multiple times.

The quality of the control system based on zonal control actions described above is significantly affected by choice of both the number of zones and their structure. Namely, an increase in the number of zones due to their refinement can only decrease the objective functional's value. So, an increase in the number of zones leads to a situation when control actions can change their values more often in time, and, therefore, on the one hand, the robustness of the control system deteriorates, and, on the other hand, this leads to rapid wear and failure of the actuating mechanisms. Conversely, an increase in the size of the zones, i.e., a decrease in their number, on the one hand, deteriorates the controllability of the object, and with a small number of them, the object may become completely uncontrollable. On the other hand, this increases the objective functional's value, i.e., the quality of control deteriorates. Taking these issues into account, the following approach is recommended, in which at first an initial value of M is arbitrarily selected and some zones are assigned. Having solved the feedback control problem, we can analyze the computed optimal zonal values of the controls for all neighboring zones. If the optimizable parameters in any two adjacent zones differ by a sufficiently small amount, then these adjacent zones can be combined into one, thus reducing the number M , the number of switchings of the control. If the optimizable parameters in any two adjacent zones differ significantly, then, on the contrary, each of these adjacent zones should be divided, for example, into two zones, i.e., increase the number M , and again solve the feedback control problem. An increase in the number of zones should be carried out until the objective functional's value ceases to change (decrease) significantly.

Remark 1. The frequency of observation times t_j , $j = 0, 1, 2, \dots, N$, should be such that while the object's state belongs to any zone, at least one observation is made. If this condition is not met, the zones through which the system's trajectory did not pass under all possible initial conditions, as well as the zones through which no state measurements were carried out, will not be assigned the values of the zonal control parameters.

Remark 2. The main issue with the proposed approach to feedback is the high dimensionality of the

optimizable control vector. The optimizable control vector's dimension represents a power function with respect to the number M of temperature intervals within the range of all possible temperature values of the object, and an exponential function with respect to the number of thermal sensors installed along the length of the rod. Besides, the number of thermal sources also affects the optimizable control vector (as a multiplication factor of the term M^{2L}). It is known that one of the basic problems of numerical optimization techniques (of any order) is the computation of optimal solutions of high-dimensional objective functions. This is because the optimization of high-dimensional objective functions is computationally expensive and cost involved, especially when seeking the global optimal solution. Many parameters characterize these kinds of problems, and many iterations and arithmetic operations are usually needed for evaluations of these objective functions. In order to speed up the evaluation of the objective functional in the posed feedback control problem, under the given value of the control vector, we can make use of the inherent concurrency present in the form of the objective functional. Namely, because the evaluation of the objective functional involves the computation of the definite integral, knowing that the elements of the sets Φ and Γ are independent, we can efficiently parallelize its computation by assigning to each thread (or process) a specific pair of elements (φ, γ) , and computing the innermost definite integral in (11) with sufficiently high accuracy. The same concurrency pattern also applies to evaluating the gradient of the objective functional.

REFERENCES

- [1] K. R. Aida-zade and S. Z. Guliyev. Optimization of location and operation modes of oilfield wells. *Computational Technologies SB RAS*. 2005. Vol. 10(4). pp. 52–62.
- [2] K. R. Aida-zade and S. Z. Guliyev. Hydraulic resistance coefficient identification in pipelines. *Automation and Remote Control*. 2016. 2016. Vol. 77(7). pp. 1225–1239.
- [3] S. Z. Guliyev. Synthesis of control in nonlinear systems with different types of feedback and strategies of control. *Automation and Information Sciences*. 2013. Vol. 45(7). pp. 74–86.
- [4] K. R. Aida-Zade and S. Z. Guliev. On numerical solution of one class of inverse problems for discontinuous dynamic systems. *Automation and Remote Control*. 2012. Vol. 73(5). pp. 786–796.
- [5] K. R. Aida-Zade and S. Z. Guliev. Numerical solution of nonlinear inverse coefficient problems for ordinary differential equations. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2011. Vol. 51(5). pp. 803–815.
- [6] K. R. Aida-Zade and S. Z. Guliev. A class of inverse problems for discontinuous systems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2008. Vol. 44(6). pp. 915–924.
- [7] S. Z. Guliev. Synthesis of zonal controls of nonlinear systems under discrete observations. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2011. Vol. 45(6). pp. 338–345.
- [8] J. Nocedal and S. Wright. *Numerical Optimization*. New-York : Springer-Verlag, 2006.
- [9] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali, and C. M. Shetty. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. New-Jersey : Wiley-Interscience, 2013.
- [10] A. Beck. *First-Order Methods in Optimization*. Philadelphia : SIAM, 2017.
- [11] A. Neculai. *Nonlinear Conjugate Gradient Methods for Unconstrained Optimization*. 1st ed, New York : Springer, 2020.

Some approximate properties of Cesaro means Fourier series

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.003>

Mzevinar Bakuridze
Batumi Shota Rustaveli State University, BSU
Batumi, Georgia
mzevinar.bakuridze@bsu.edu.ge

Alexsander Bakuridze
Batumi Shota Rustaveli State University, BSU
Batumi, Georgia
alexsander.bakuridze@bsu.edu.ge

Khatia Japaridze
Batumi Shota Rustaveli State University, BSU
Batumi, Georgia
khatia.japaridze@bsu.edu.ge

Abstract—It is established $\sigma_n^a(x, f)$ Cesaro means some approximate features. The paper discusses the new property of the negative order Cesaro mean of the Fourier trigonometric series.

Keywords—Chesaro means; Fourier trigonometric series.

I. INTRODUCTION

Suppose, that $T = [-\pi, \pi]$ and $f : R \rightarrow R$ 2π - are periodic functions. If $f \in L(T)$ as a rule, $\sigma(f)$ represent respectively trigonometric Furrier series

$$\sigma[f](x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos kx + b_k \sin kx, \quad (1)$$

where

$$\left. \begin{aligned} a_k &\equiv a_k(f) = \frac{1}{\pi} \int_T f(t) \cos kt \, dt, \quad k \in N_0 \\ b_k &\equiv b_k(f) = \frac{1}{\pi} \int_T f(t) \sin kt \, dt, \quad k \in N. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Assume that $p \in [1, +\infty[$ - is a number. For each function $f \in L^p(T)$ the following will be considered

$$\|f\|_p = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_T |f(t)|^p \, dt \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad (3)$$

And also it will consider the following:
 $L^\infty(T) = c(T)$, $\|f\|_c = \|f\|_\infty = \sup_{x \in T} |f(x)|$. Let us set

$$\omega^{(k)}(\sigma, f) = \sup_{|h| \leq \sigma} \left\| \sum_{j=0}^k (-1)^{k+j} \binom{k}{j} f(t+jh) \right\|_p; \quad \sigma \in]0, 2\pi].$$

$\omega^{(k)}(\sigma, f)$ is called module L^p of smoothness of an order to function f .

II. MAIN PART

In the future we will assume that $\omega^{(1)}(\sigma, f)_p \equiv \omega(\sigma, f)_p$.

BellowA, $A(f)$ $A(f, p)$, $A(f, a, p)$, $A(a)$, $A_1(a)$, ... indicate absolute positive or positive constants depending only on the specified parameters.

Let ω -be module of continuity. Assume that

$$H_p^\omega \equiv H_p^\omega(T) = \{f : \omega(\sigma, f)_p \leq A(f, p)\omega(\sigma)\}$$

and $H_p^\omega = H^\omega$. If $\omega(\sigma) = \sigma^\alpha$, $\alpha \in]0, 1]$, than $H_p^\omega \equiv Lip(a, p)$. $H^\omega \equiv Lipa$.

With $S_n(x, f)$ we will define, respectively partial sums of the series

$$\begin{aligned} S_n(x, f) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos kx + b_k \sin ks = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_T f(x+t) D_n(t) \, dt, \end{aligned} \quad (4)$$

where $D_n(t)$ - is Dirichlet kernel, i.e.

$$D_n(t) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \cos kt = \sin\left(n + \frac{1}{2}\right)t / 2 \sin \frac{t}{2}, \quad (5)$$

and $D_n(0) = n + 0.5$, $n \in N$.

Consider that

$$A_k^a = 1, \quad A_k^a = \frac{(a+1)(a+2)(a+3)\dots(a+k)}{k!}, \quad (6)$$

$$k \in N, \quad a > -1.$$

It is known (see e.g. A. Sigmund [7], pp. 130-131) that

$$A_k^a = \sum_{i=0}^k A_{k-i}^{a-1}, \quad A_k^a - A_{k-1}^a = A_k^{a-1} \quad (7)$$

$$A(a) \leq \frac{A_k^a}{k^a} \leq A_1(a). \quad (8)$$

If

$$K_n^a(t) = \frac{1}{A_n^a} \sum_{k=0}^n A_{n-k}^{a-1} D_k(t), \quad (9)$$

than they are respectively called Cesaro kernel. It is known that (see e.g. A. Sigmund [2] pp. 157-164), that

$$K_n^a(t) = \varphi_n^a(t) + r_n^a(t), \quad (10)$$

where

$$\varphi_n^a(t) = \frac{\sin \left[\left(n + \frac{1}{2} + \frac{a}{2} \right) t - \frac{a\pi}{2} \right]}{A_n^a \left(2 \sin \frac{t}{2} \right)^{1+a}} \quad (11)$$

and

$$\|K_n^a\|_c \leq A(a)n, \quad (12)$$

$$|\tau_n^a(t)| \leq \frac{A(a)}{nt^2}, \quad \frac{\pi}{n} \leq t \leq \pi, \quad (13)$$

In what follows we shall use the Holder inequality for integrals. If $f_1 \in L^p(T)$, $f_2 \in L^q(T)$ and $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, then

$$\|f_1 f_2\|_L \leq \|f_1\|_p \|f_2\|_q. \quad (14)$$

We also use the Minkowski inequality. If $f_1 \in L^p(T)$, $f_2 \in L^p(T)$, $p \in [1, +\infty[$, then

$$\|f_1 + f_2\|_p \leq \|f_1\|_p + \|f_2\|_p \quad (15)$$

Assume that function $f \in L(T)$ than $\sigma_n^a(x, f)$ $t_n^a(x, f)$ symbols denotes the Cesaro means of order $a > -1$ consequently $\sigma[f]$ i.e.

$$\sigma_n^a(x, f) = \frac{1}{A_n^a} \sum_{k=0}^n A_{n-1}^{a-1} S_k(x, f), \quad (16)$$

where A_n^a ($i=1, 2, \dots$) and $S_k(x, f)$ are given to relations (6) and (4). Using the equalities (4), (5), (9) and (16), we can write

$$\begin{aligned} \sigma_n^a(x, f) &= \frac{1}{\pi} \int_T f(x+t) K_n^a(t) dt = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_T [f(x+t) + f(x-t)] K_n^a(t) dt \end{aligned} \quad (17)$$

Zigmund proved that if the function $f \in c(T)$ and

$$\omega(\delta, f)_c = \overline{O}(\delta^\alpha)(\delta \rightarrow +0), \quad \alpha \in]0; 1[, \quad (18)$$

then

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|\sigma_n^{-\alpha}(f) - f\|_c = 0. \quad (19)$$

In the writings of Hardy and Littlewood mentioned provision was generalized, in particular, they showed that if $f \in c(T)$ and

$$\omega(\delta, f)_p = \overline{O}(\delta^\alpha)(\delta \rightarrow +0), \quad \alpha \in]0; 1[, \quad \alpha p > 1, \quad (20)$$

then it is executed (19). They showed that when

$$f \in c(T) \cap \text{Lip}(\alpha, p), \quad \alpha \in]0; 1[, \quad \alpha p > 1,$$

Then for any $\beta \in]0; \alpha[$ numbers the following ratio is valid yeah

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|\sigma_n^{-\beta}(f) - f\|_c = 0. \quad (21)$$

Our goal is to evaluate the above expression

$$\|\sigma_n^\alpha(x, f) - f\|_c.$$

With the help of the modules of continuity of space $c(T)$ and $L^p(T)$. These estimates will be taken some new position in relation to the behavior $\sigma_n^\alpha(x, f)$ means.

III. CONCLUSION

The following in true Theorem.

Let $a \in]0, 1[$ - a certain number $ap = 1$, $\beta \in]0, a[$ and $0 < \lambda < 0.5$.

If $\lambda \geq 1/(1+a)$ than for the function $f \in c(T)$ the following inequality is true

$$\begin{aligned} \|\sigma_n^{-\beta}(f) - f\|_c &\leq A(a, \beta) \left[\omega^{\lambda(a-\beta)} \left(\frac{1}{n}, f \right)_c \right] + \\ &+ \left[1 + n^a \omega \left(\frac{1}{n}, f \right)_p \right] + A(\beta) g(n, f) \end{aligned}$$

The given theorem represents a new property of the Cesaro mean of the negative order of the trigonometric Fourier series.

REFERENCES

- [1] A. Zigmund. Trigonometric series. 3rd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 1965.
- [2] G. G. Xardi, D. E. Littlvud, and G. Polya. Inequalities. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2001.
- [3] L. V. Zhizhiashvili. Some problems about trigonometric series and its conjugates. Tbilisi : Tbilisi University Press, 1993 (in Russian).
- [4] M. S. Bakuridze. Some approximate properties of Cesaro mean Fourier series and their conjugates. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*. 2015. Vol. 4(6).
- [5] M.S. Bakuridze. Some approximate properties of Cesaro mean Fourier series and their conjugates. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*. 2016. Vol. 5(4).
- [6] M. S. Bakuridze and A. S. Bakuridze. Some approximate properties of Cesaro mean Fourier series. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*. 2018. Vol. 7(3).

Artificial Intelligence Application for Unmanned Aerial Vehicle Navigation

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.004>

Azad Bayramov
Institute of Control Systems
Baku, Azerbaijan
azad.bayramov@yahoo.com

Samir Suleymanov
Institute of Geology and Geophysics
Baku, Azerbaijan
ofis.setm@gmail.com

Abstract—This paper analyzes the use of artificial intelligence technology for autonomous control of an unmanned aerial vehicle. The remote control in difficult conditions limits the capabilities of the unmanned aerial vehicle and reduces the efficiency of the entire system. Therefore, an urgent task is the autonomous navigation of an unmanned aerial vehicle using artificial intelligence technology. In this case, the aircraft can perform tasks depending on the variability of external factors. Artificial intelligence in the autonomous control of an unmanned aerial vehicle plays an important role in ensuring the characteristics of human control. The paper explores several artificial intelligence approaches for autonomous navigation of an unmanned aerial vehicle: mathematical optimization, learning programs. Various characteristics, types, models of navigation are analyzed. The equation for the errors of the inertial navigation system in the normal earth's coordinate system is analyzed.

Keywords—Unmanned Aerial Vehicle; autonomous navigation; artificial intelligence; navigation models.

I. INTRODUCTION

It is known that unmanned aerial vehicles (UAVs) cannot perform their tasks optimally due to reliance on human control and limitations of radio communications. Therefore, autonomous UAV navigation plays an important role in achieving an optimal result. Various methods of localization, mapping and detection methods are used to achieve autonomous navigation. Many works [1-5] are devoted to these methods.

Up to now, the various navigation methods have been proposed: inertial navigation, satellite navigation and observation-based navigation. However, depending on the task, it is necessary to choose the optimal technology for UAV autonomous navigation. One of the effective ways is the Artificial Intelligence (AI) technology, which is widely used in the field of engineering research. AI can detect anomalies and predict the potential of scenarios, respond to changing situations, study complex problems associated with huge amounts of data, and find regularities that a human might ignore. It can analyze and use external factors to improve the maneuvering of the UAV.

AI control technologies are used to increase the autonomy of the UAV to the level of self-management. While there is no universal consensus on how to define or measure an intelligent system, there are several characteristics that an intelligent controller possesses: adaptability, learning ability, non-linearity, autonomous

character interpretation, and goal-directedness. In the case of AI-assisted UAV flight, the controller output is determined using an input sensor to create an internal representation (recognition) of the environment. In this they differ from UAVs, where pre-established mathematical models are used [6].

II. UAV NAVIGATION MODEL

There are many different types of UAVs for military and civilian applications. UAVs are often classified according to characteristics related to shape, flight range, maximum takeoff weight and payload. The payload may include cameras, sensors, mobile phones and bases, cellular assistance stations. The larger the payload, the more equipment, and accessories can be carried.

UAV navigation can be divided into four categories according to application: outdoor navigation, indoor navigation, search and rescue navigation, and wireless network navigation, as shown in fig. 1. External navigation includes surveillance, delivery of goods, target tracking, and crowd monitoring. Indoor navigation includes indoor mapping, production automation, and indoor surveillance. In addition, UAV navigation can be categorized by navigation parameters: inertia navigation, signal navigation, and surveillance navigation. For the inertial navigation, UAVs use gyroscopes, accelerometers, and altimeters to control the onboard flight controller. UAVs use GPS modules and a remote radio head in the case of cellular communications for signal-based navigation, and cameras for visual navigation.

At first, the altitude and horizon controllers receive signals from these sensors and the pitch and yaw controllers depending on the trajectory. Then the pitch and yaw controllers control the elevators and maneuvering ailerons of the UAV depending on the signals from these sensors, as shown in Fig. 2 [7].

The planned path of the UAV during autonomous flight is carried out using various methods of artificial intelligence: optimization-based approaches or learning-based approaches. The UAV flies autonomously [7] using various artificial intelligence methods: optimization-based approaches or learning-based approaches.

Optimization-based approaches include:

- particle swarm optimization;

- ant colony optimization;
- genetic algorithm;
- simulated annealing;
- pigeon-inspired optimization;
- cuckoo search algorithm;
- dijkstra and A* algorithm;
- differential evolution;
- grey-wolf optimizer;
- miscellaneous algorithms.

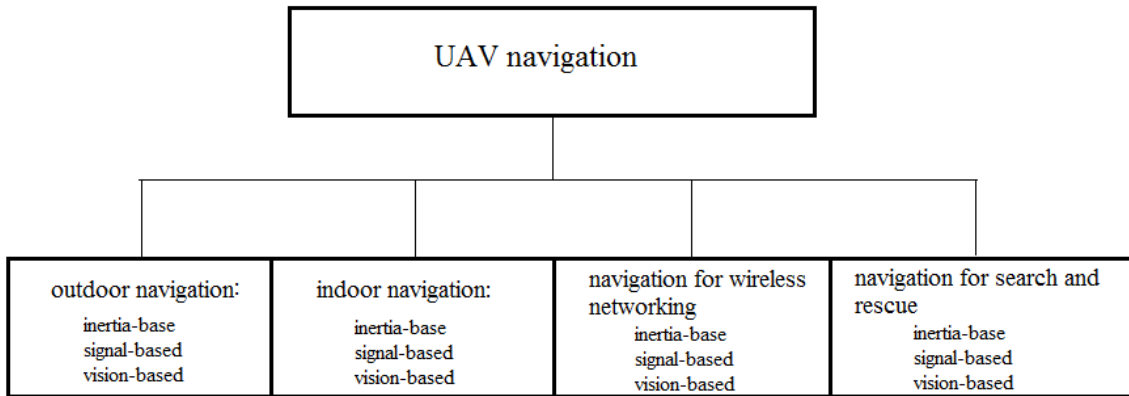


Figure 1. UAV navigation architecture

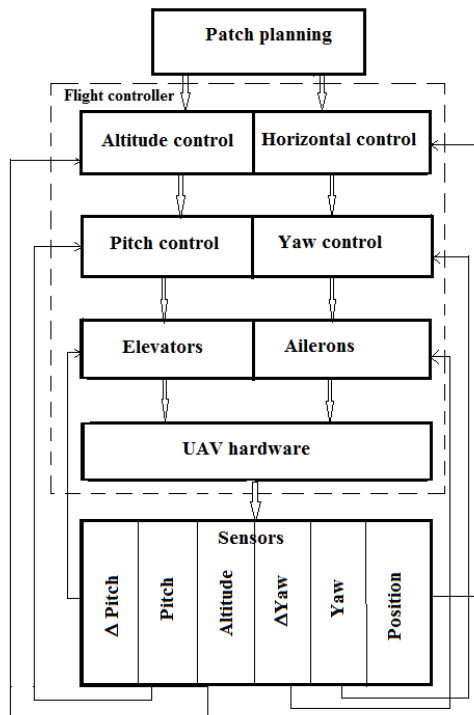


Figure 2. UAV navigation system model

Methods and technologies based on mathematical optimization cover traditional mathematical algorithms for solving AI problems. These algorithms make it possible to achieve near-optimal solutions for any given non-deterministic polynomial complex problem. However, these algorithms are quite difficult in terms of characteristics such as time and coordinates [8]. Let considered some of these approaches.

Particle swarm optimization determines the movement of a particle depending on its current position and speed. Particle speed continues to update based on the optimal position vector. The swarm optimization reaches its optimum position when it reaches its target

or at the lowest possible error. In navigation, the swarm optimization treats the UAV as particles and controls their movement in 3D space.

Regarding autonomous UAV navigation, an ant colony optimization based solution for multiple colonies has been proposed, avoiding the complexities of 3D space. The multiplicity of ant colony optimization particles overcomes the problem of premature convergence caused by a single colony. Initially, the UAV navigation problem was formulated as a traveling salesman problem, and then as a multi-part problem when a group of UAVs were looking for the best routes to their destination.

Genetic algorithm is a stochastic optimization algorithm that starts with a population of randomly generated chromosomes known as a start population. Each gene on a chromosome is a series of numerical numbers. Each chromosome in this study reflects the trajectory of the UAV, which is constrained by the dynamics of the UAV. Genetic operations such as crossbreeding, mutation, selection, insertion and deletion will periodically change the population in each generation. The goal of this procedure is to decrease the fitness function as much as possible by identifying a chromosome with a near minimum fitness value.

Simulated annealing is an approximation approach describing a continuous process that converges to a global minimum. For example, let consider a continuous process of heating and cooling metals. When a metal is heated, the atoms vibrate and change configuration with minimal energy. After that, the metal is slowly cooled to provide the minimum configuration energy. The simulated annealing algorithm imitates the same process to obtain a global minimum for complex problems with a polynomial estimate of the time spent in running the algorithm.

III. UAV INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM

An integrated navigation system should carry out joint processing of information from a strapdown inertial navigation system, a satellite navigation device and a radio engineering system for measuring altitude and velocity components. At the same time, the main task solved by the integrated navigation system is the development of reliable navigation information for the UAV control system with the required errors and dynamic characteristics.

Inertial sensors for primary information, which are part of the block of sensitive elements of the strapdown inertial navigation system:

- a three-axis accelerometer unit that measures the parameters of the linear motion of an object relative to inertial space (apparent acceleration \vec{a}_{k1});
- three uniaxial laser gyroscopes that measure the parameters of the angular motion of an object relative to inertial space (angular velocity $\vec{\omega}_1$).

The most significant components that determine instrumental errors are:

- offset of the zero signal;
- error of the scale conversion factor;
- non-orthogonality of the measuring axes of the sensors;
- casual care.

The inertial navigation system is the main meter of trajectory motion and orientation parameters in the integrated navigation system and provides continuous calculation and output to the user (in the UAV control system) of the required navigation information.

The fundamental strategy for implementing simulated annealing algorithm is to select random points in the vicinity of the current best point and quantify the cost functions. Then, the UAVs move from one point to another, comparing the values of the current and next point. Note, that simulated annealing optimization is a time-consuming process.

Learning-based approaches cover traditional models based on AI algorithms. These algorithms can achieve near-optimal results for any given non-deterministic polynomial-time hard problem with very low complexity.

The following are the most widely used learning-based AI approaches for UAV navigation:

- reinforcement learning;
- deep reinforcement learning: Markov decision process and partially observable Markov decision process;
- asynchronous advantage actor-critic;
- deep learning;
- miscellaneous learning algorithms.

When complexing an inertial navigation system, a satellite navigation device and a radio engineering system for measuring altitude and velocity components, an error model of the integrated navigation system is adopted, including the errors of these systems, as the equations of state of the filter for joint information processing. Taking into account the equations of inertial navigation, there are the following equations (1) for the errors of the inertial navigation system in the normal terrestrial coordinate system (without taking into account nonlinear components and insignificant components).

The satellite navigation device outputs according to a standard protocol with a frequency of 1 Hz, transmits transport information about object's coordinates and speed, parameters for linking information to the time of their calculation (time marker), the estimated value of the standard deviation, coordinate errors, signs and reliability of data.

Studies of the characteristics of a satellite navigation device as part of a ground testing complex make it possible to form the following error model of navigation information:

- systematic component of coordinate error $2\sigma \leq 2$ m;
- systematic component of the height error $2\sigma \leq 12$ m;
- random component of coordinate error $2\sigma \leq 1$ m;
- systematic component of the speed error $2\sigma \leq 0,05$ m/sec;
- random component of speed error $2\sigma \leq 0,03$ m/sec.

The random component of the satellite navigation device according to the projections of the velocity vector has the character of "white" noise with a sampling

period of 1 sec. The random component of the satellite navigation device in terms of location coordinates

corresponds to the output of 2nd order shaping filter with a time constant ≈ 30 sec.

$$\begin{cases} \Delta(d\vec{R}_g / dt) = \Delta\vec{V} \\ \Delta(d\vec{V}_g / dt) = -\vec{\Psi} \times A_{g1}\vec{a}_{k1} + A_{g1}\Delta\vec{a}_{k1} + \Delta\vec{g}_g - 2\vec{\Omega}_g \times \Delta\vec{V}_g \\ d\vec{\Psi} / dt = -\vec{\Omega}_g \times \vec{\Psi} + A_{g1}\Delta\vec{\omega}_1 \end{cases} \quad (1)$$

Here:

$\Delta\vec{R}_g, \Delta\vec{V}_g, \vec{\Psi}$ are the position, speed and orientation error vectors;

A_{g1} is the orientation matrix of the normal earth coordinate system with respect to the bound;

$\Delta\vec{g}_g$ is the gravity error;

$\vec{\Omega}_g$ is the angular velocity of the Earth's rotation;

$\vec{a}_{k1}, \Delta\vec{\omega}_1$ are the instrumental errors of accelerometers and gyroscopes.

In addition to the above statistical characteristics, the satellite navigation device has a delay in issuing navigation information about the speed of movement, which is about 1.1 sec.

IV. CONCLUSION

This paper analyzes the use of artificial intelligence technology for autonomous control of an UAV. Artificial intelligence in the autonomous control of UAV plays an important role in ensuring the characteristics of human control. The paper explores several artificial intelligence approaches for autonomous navigation of UAV: mathematical optimization and learning programs. Various characteristics, types, models of navigation are analyzed. The equation for the errors of the inertial navigation system in the normal earth's coordinate system is investigated. The UAV autonomous AI navigation has provided greater flexibility and improved performance in complex dynamic environments.

This review summarizes the UAV navigation system and application-based classification. In terms of methods based on optimization and learning, the fundamentals, operating principles and critical features of numerous artificial intelligence algorithms used for autonomous UAV navigation have been described. Various optimization-based algorithms have been analyzed. These methods have been modified according to their requirements in order to achieve optimal results. The training algorithms were classified and analyzed.

Various neural networks, learning parameters, and decision processes were used to complete their tasks. After analyzing all approaches to artificial intelligence, the comparative studies were presented comparing all methods from the same point of view.

Thus, various resources and data related to UAV autonomous navigation and artificial intelligence are available for further research and development. AI can be computationally expensive, but it improves the overall performance of the UAV in terms of important parameters such as power consumption, flight time and

communication latency in a complex dynamic environment for any tasks.

REFERENCES

- [1] L. Schroth. Drones and Artificial Intelligence. URL: <https://www.droneii.com/drones-and-artificial-intelligence>. (Accessed: October 16, 2023).
- [2] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Commun. Mag.* 2016. Vol. 54(5). Pp. 36–42.
- [3] M. Sheraz, M. Ahmed, X. Hou, Y. Li, D. Jin et al. Artificial intelligence for wireless caching: Schemes, performance, and challenges. *IEEE Commun. Surveys Tuts.* 2021. Vol. 23(1). Pp. 631–661.
- [4] Y. Zhao, Z. Zheng, and Y. Liu. Survey on computational-intelligence based UAV path planning. *Knowl.-Based Syst.* 2018. Vol. 158. Pp. 54–64.
- [5] A. Fotouhi, H. Qiang, M. Ding, M. Hassan, L. G. Giordano et al. Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges. *IEEE Commun. Surveys Tuts.* 2019. Vol. 21(4). Pp. 3417–3442.
- [6] J. A. Miller, A. F. Niessner, A. M. DeLullo, P. D. Minear, and N. Long. Intelligent Unmanned Air Vehicle Flight Systems. *Proceedings of AIAA InfoTech@Aerospace Conference.*(Washington D.C., Sept. 26–29, 2005). 2005. 2005–7081.
- [7] R. Zhai, Z. Zhou, W. Zhang, S. Sang, and P. Li. Control and navigation system for a fixed-wing unmanned aerial vehicle. *AIP Advances.* 2014. Vol. 4(3). Pp. 1–10.
- [8] S. Rezwan, W. Choi. Artificial Intelligence Approaches for UAV Navigation: Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Access.* 2022. Vol. 10. Pp. 26320–26339. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3157626.

Calibration of Dobson model for improving soil moisture retrievals from AMSR satellite imagery

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.005>

Mykhailo Boiko

EOS Data Analytics,

Department of Computer Sciences and Applied
Mathematics

National University of Water and Environmental
Engineering

Rivne, Ukraine

m.v.boiko@nuwm.edu.ua

Olena Belozeroва

EOS Data Analytics,

Department of Computer Sciences and Applied
Mathematics

National University of Water and Environmental
Engineering

Rivne, Ukraine

Abstract—Satellite-based retrieval of environmental variables has seen rapid advancements in recent years, although it remains challenged by various sources of uncertainty. In this study, we endeavor to enhance the accuracy of soil moisture estimation from AMSR imagery through parameter calibration. Our focus is on calibrating the Dobson dielectric mixing model, a component of the radiative transfer model that relies heavily on empirical relationships.

The calibration process is based on black-box optimization techniques for the retrieval problem. We have adapted the CORS optimization algorithm to address the specific characteristics of our task. We also considered different target functions for calibration.

To evaluate the efficacy of our framework, we conducted tests across a dataset comprising 118 ground stations in the United States. The outcomes reveal that optimizing parameter settings can provide limited improvement to the accuracy and, when configured accordingly, address specific issues such as bias correction. Calibration emerges as a potent tool for refining surface soil moisture retrievals, although its effectiveness tends to diminish in larger calibration areas.

Keywords—satellite soil moisture; model calibration; black-box optimization; Dobson model.

I. INTRODUCTION

Soil moisture (SM) measurement is essential in comprehending the hydrological cycle and its implications on weather and climate. Precise estimations of soil moisture are essential for advancing our knowledge of the surface energy budget and research of hydrological, ecological and atmospheric processes.

Remote sensing satellites have emerged as a formidable tool in the hydrological community for retrieving soil moisture. Despite their capability to assess only the topmost soil layer (typically 1–5 cm), it nevertheless carries significant importance across various environmental domains, encompassing hydrology, meteorology, agriculture, and climate change.

Microwave techniques have obtained widespread recognition for their potential in routine soil moisture retrieval, whether through active or passive sensors. Notably, soil moisture retrieval from Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) data has

exhibited lower accuracy compared to active (e.g., Sentinel-1) and active-passive sensors (SMAP). Research findings have consistently pointed to systematic biases in AMSR-E's soil moisture observations. One of the ways to enhance the quality of soil moisture retrievals is calibration of LPRM parameters [1].

In this study, we concentrate on the parameters embedded within the Dobson soil-water dielectric mixing model. This model, apart from satellite SM retrieval, finds application in other soil moisture monitoring technologies, such as in-situ soil moisture sensors. The Dobson model serves as a means to convert sensed dielectric constant values into soil moisture, and it has seen calibration adaptations to accommodate specific properties such as soil temperature [2], clay content [3], and tillage [4].

The task of calibrating LPRM requires a cost-effective optimization algorithm. Given the absence of analytical rules that can be derived from the model, the task necessitates utilization of what is commonly referred to as a black-box optimization method. Such methods encompass various techniques, some of which are exemplified by [5; 6]. A common feature among them is incorporation of a surrogate – an approximated hyperplane that is subject to optimization instead of the original function. This surrogate strategy is effective for high-dimensional problems and particularly advantageous for dealing with the computational expense associated with function evaluations [7].

In our specific context, we employ a modified CORS algorithm (COordinate search using Response Surfaces) [8] to fine-tune the parameters of the Dobson model. We propose further adaptations for this method to adapt it for calibration tasks.

II. MODELS AND METHODS

A. Land Parameter Retrieval Model (LPRM) and Dobson model

Our focus in this study is on soil moisture retrieval via the Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E), which relies on passive microwave theory and employs the Land Parameter Retrieval Model (LPRM) to facilitate this process.

Dielectric mixing models cover the relation between soil moisture and dielectric constant, that is

further related to brightness temperature. It takes advantage of the substantial disparity in dielectric constants of dry soil ($\epsilon \approx 6$) and water ($\epsilon \approx 80$) at microwave frequencies [9].

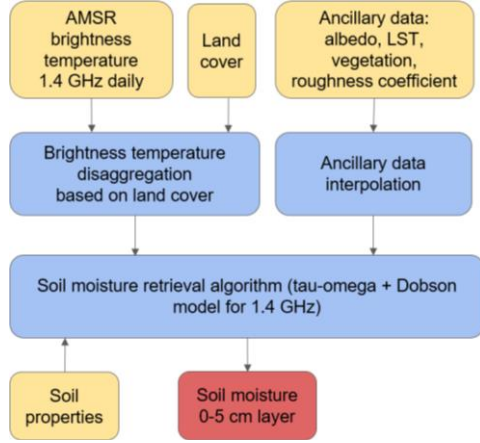


Figure 1. Schematic representation of the key steps in the Land Parameter Retrieval Model (LPRM). Soil moisture is calculated by matching the observed brightness temperature with the model-predicted brightness temperature from radiative transfer

One of the most popular dielectric mixing models is a semi-empirical model developed by Dobson et al. [10]. It covers a broad frequency range, between 1.4 and 18 GHz, and provides both the real and imaginary components of the dielectric constant in terms of the soil texture (% sand, silt and clay), bulk density and volumetric soil moisture [9]. According to the semi-empirical formulation of Dobson model, complex dielectric constant ϵ is calculated as

$$\begin{aligned} \text{Re}(\epsilon) &= (1 + 0.66\rho_b + \theta^{\beta_1} \cdot \text{Re}(\epsilon_w)^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}}, \\ \text{Im}(\epsilon) &= \theta^{\beta_2} \cdot \text{Im}(\epsilon_w), \end{aligned} \quad (1)$$

where θ is volumetric soil moisture, ϵ_w is complex dielectric constant of the water contained in the soil, ρ_b – soil bulk density. Coefficients α, β_1, β_2 in (1) are empirical parameters estimated as follows (according to [11]):

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.65, \\ \beta_1 &= 1.27 - 0.519 S - 0.152 C, \\ \beta_2 &= 2.06 - 0.928 S - 0.255 C. \end{aligned} \quad (2)$$

The key factor determining dielectric constant of water is soil temperature. They are linked through the static dielectric constant of water ϵ_{w0} , empirically calculated as

$$\epsilon_{w0} = 88.045 - 0.4147 T + 6.295 \cdot 10^4 T^2 + 1.075 \cdot 10^5 T^3, \quad (3)$$

where T is soil temperature.

Relations (2), (3) are deciding in estimating soil dielectric constant. Therefore, we selected the empirical coefficients in these relations as target for calibration. Empirical parameters β are the most obvious candidates for calibration, since they determine the model response to the soil composition. Moreover, we add soil bulk density ρ_b as another important soil parameter that is already in use by the model. The changes to parameter α are suggested in a number of studies, including [2]. As for the temperature dependent dielectric constant of water ϵ_{w0} , more accurate temperature response might help to adapt the model to actual climatic conditions. The chosen calibration ranges for parameters are given in Table 1.

TABLE I. CHOSEN CONSTRAINTS FOR CALIBRATION OF THE DOBSON MODEL PARAMETERS

Parameter	Term	Default value	Calibration constraints	
			Minimum	Maximum
alpha	1	0.65	0.6	0.7
beta1	1	1.270	1.143	1.397
	sand	-0.519	-0.571	-0.467
	clay	-0.152	-0.167	-0.137
	density	0	-0.1	0.1
beta2	1	2.06	1.864	2.266
	sand	-0.928	-1.021	-0.835
	clay	-0.255	-0.281	-0.230
	density	0	-0.1	0.1
ew0	1	88.045	79.241	96.850
	T	-0.414	-0.456	-0.373
	T2	0.00063	0.0004	0.00075

B. Modified CORS calibration algorithm

We seek to calibrate the semi-empirical Dobson model for optimal alignment with in situ soil moisture data. This calibration involves minimizing soil moisture estimation errors within the Land Parameter Retrieval Model (LPRM), which is computationally intensive and implicitly defined, necessitating the use of an efficient black-box optimization algorithm.

CORS (COordinate search using Response Surfaces) is our chosen algorithm for constrained, costly black-box optimization. It employs radial basis function (RBF) surrogates to approximate the objective function, controlling the time cost by defining a specific number of expensive function calls. This allocation is divided into two phases:

- 1) *Initialization Phase*: Here, the algorithm evaluates the function at randomly selected points to construct an initial surrogate function. The most promising points are then identified.
- 2) *Refinement Phase*: Building on the promising points, the algorithm iteratively suggests new points optimized by the surrogate hyperplane. These points are evaluated for function values and contribute to the ongoing refinement of the surrogate. This process continues until remaining resource of points is exhausted.

The necessary prerequisite for applying the above technique is to normalize the value constraints of all calibrated parameters to a range of [0; 1]. This normalization transforms the search space into a uniform unit cube, ensuring consistent distances for surrogate optimization.

The initial set of points has to be distributed evenly across the problem space. Original implementation of the algorithm implemented Latin hypercube approach for point spacing. However, we found that in case of high dimensionality the Poisson disk sampling method produces a more even distribution of points. This algorithm is notable for ensuring that points are located no closer to each other than a pre-set minimum distance, resulting in a more intuitive distribution [12].

The original algorithm also suggests that the given number of function calls should be split equally between initial and refinement points. After experimenting with the point division, we found that increasing the number of initial points above a specific number provides no additional improvement to final result. In our case, 50 points proved enough for a reasonably good initial

distribution. The remaining points (25 at least) are used to refine the initial estimation.

Also, a number of other minor modifications to the algorithm proposed in [8] was introduced. We removed normalization step before estimation of target function, since SM values are already contained within the [0; 1] interval and additional scaling could lead to misinterpretations. Multiquadric radial basis function was chosen for surrogate approximation, and the initial SLSQP optimization method was replaced by Nedler-Mead.

C. Example test of optimization method

Before embarking on the actual validation experiment, we conducted a preliminary assessment of our modifications using a theoretical problem. The task involved optimizing the valley function defined as

$$f(x, y) = |x - y| + \left(\frac{x + y - 1}{3}\right)^2, 0 \leq x, y \leq 1.$$

While the optimal solution of the problem is obvious analytically, functions with valley-like characteristics are well-known for posing significant optimization challenges.

In Figure 2, we present simulation details for both the original and adapted algorithms, considering a limitation of 100 points. Our modified algorithm produced a better solution by focusing on local minima points identified through the initial distribution. Conversely, the original algorithm extensively explored a more diverse set of points, leading to the inability to reach the optimal solution within the prescribed number of points.

D. Experimental setting

In this study, we take disaggregated AMRS-2 L-band satellite imagery. The image data are processed with LPRM model to estimate surface SM. These results are further denoted as reference values. Both the reference and values produced after model calibration are validated against ground data using the following metrics: root mean squared error (RMSE), correlation (R), average relative error (ARE) and index of agreement (IoA).

To validate our results, we utilize in-situ sensor data sourced from the International Soil Moisture Network (ISMN) [13]. Due to technical reasons, we selected for analysis a single imagery tile in North East of the USA, comprising the area between 41.35° and 49.65° latitude and between -116.2° and -107.25° longitude, with a total of 118 ground stations. For both satellite imagery and in-situ datasets we use records for the whole length of 2015.

III. RESULTS

We perform calibration with different target metrics: RMSE, ARE and correlation, as well as evaluation of reference values. Summary of validation results is presented in Table 2. Here units for RMSE, ARE and bias are the same as SM units, $m^3 \cdot m^{-3}$.

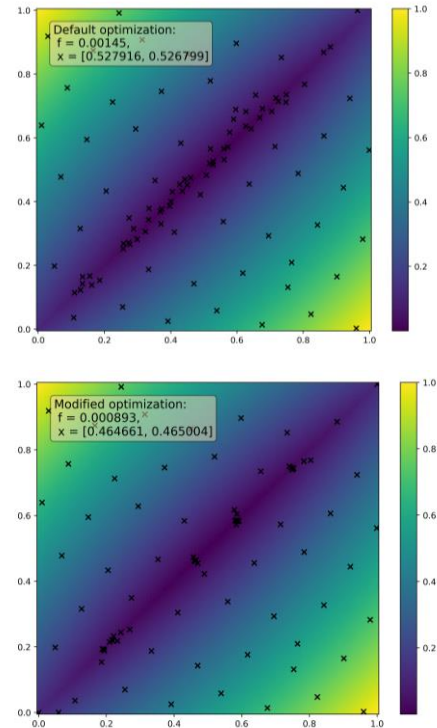


Figure 2. Performance of the original (top) and modified (bottom) optimization algorithms for a valley function

The metrics presented in Table 2 indicate that calibration can only achieve partial improvement. Correlation between the satellite retrievals and ground data is very low in the selected region due to the terrain complexity and presence of different soil types. Moreover, results for ARE metric are extremely high due to the fact that SM values can be close to 0.

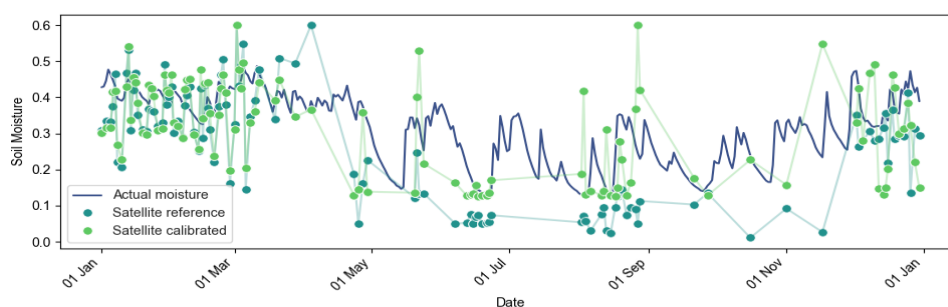
The results vary greatly with chosen calibration metric. Calibration improves result for the target metric, yet this is achieved at expense of other characteristics. Therefore, the choice of target metric must be made according to the desired properties of the result. RMSE is the most stable metric for removing bias and variation errors. Correlation should be chosen if general agreement of trends is the priority. Surprisingly, ARE proved to be a good conservative metric that provides improvement without loss of agreement.

TABLE II. VALIDATION RESULTS FOR SM SATELLITE ESTIMATES, INCLUDING REFERENCE VALUES AND CALIBRATED BY RMSE, ARE AND CORRELATION

Calibration metric	RMSE	ARE	R	IoA
Reference	0.157	1.152	0.087	0.436
RMSE	0.114	4.979	-0.110	0.244
ARE	0.153	0.674	-0.103	0.436
R	0.171	1.267	0.126	0.449

Further, we investigate the influence of calibration of the final result. For this purpose, we select one of the ground stations from the dataset and compare the estimated SM values before and after calibration. Fig. 3 shows the time series of actual, reference and calibrated SM on station McAlister Farm.

The moisture trends on Fig. 3 indicate that calibration is capable of shifting the estimates in a way that is close to linear scaling, with occasional deviations.



Comparison of reference and calibrated satellite estimates with in-situ soil moisture data on station McAlister Farm

The initial reference estimate underestimated actual soil moisture, but calibrated version attempts to remove this obvious bias. However, the estimated trend remains largely unchanged. This example agrees with our previous results in the fact that correlation cannot be greatly improved with parameter calibration. Instead, target metrics that compare actual values (such as RMSE and ARE) can decrease bias and yield overall better results.

IV. CONCLUSION

In this study, we calibrated Dobson model to improve soil moisture estimation from AMSR satellite data. We applied a surrogate-based optimization algorithm to determine optimal parameters of the model. We also proposed modifications to the CORS optimization algorithm, which have demonstrated their effectiveness for the functions of high complexity with multiple local minima.

The findings strongly suggest that calibrating components within the Land Parameter Retrieval Model presents an effective approach for mitigating bias in soil moisture estimates. This calibration method is most effective at the local or regional level.

The choice of an appropriate target function for calibration emerges as a critical factor in achieving specific optimization objectives, whether it involves enhancing agreement or removing bias. This flexibility enables tailored results aligned with specific research goals.

ACKNOWLEDGMENT

We extend our sincere appreciation to EOS Data Analytics for their generous support in conducting this research, providing data and computational resources.

REFERENCES

- [1] D. Al-Sharafany. Soil moisture retrieval from the AMSR-E. *Agricultural Water Management. Theories and Practices*. London : Academic Press, 2021. Pp. 241–278.
- [2] M. Schwartz, Z. Li, T. Sakaki, A. Moradi, and K. Smits. Accounting for Temperature Effects on the Performance of Soil Moisture Sensors in Sandy Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2019. Vol. 83. Pp. 1319–1323.
- [3] R. C. Schwartz, S. R. Evett, and J. M. Bell. Complex Permittivity Model for Time Domain Reflectometry Soil Water Content Sensing: II. Calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2009. Vol. 73. Pp. 898–909.
- [4] R. C. Schwartz, A. J. Schlegel, J. M. Bell, R. L. Baumhardt, and S. R. Evett. Contrasting tillage effects on stored soil water, infiltration and evapotranspiration fluxes in a dryland rotation at two locations. *Soil and Tillage Res.* 2019. Vol. 190. Pp. 157–174.
- [5] P. S. Palar, Y. B. Dwianto, R. G. Regis et al. Benchmarking Constrained Surrogatebased Optimization on Low Speed Airfoil Design Problems. *Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'19, July 13–17, 2019)*, Companion, Prague, Czech Republic, 2019. Pp. 1990–1998.
- [6] P. Beucaire, Ch. Beauthier, and C. Sainvitu. Multi-point infill sampling strategies exploiting multiple surrogate models. *Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'19, July 13–17, 2019)*. Companion, Prague, Czech Republic, 2019. Pp. 1559–1567.
- [7] R. G. Regis. A Survey of Surrogate Approaches for Expensive Constrained Black-Box Optimization. *Optimization of Complex Systems: Theory, Models, Algorithms and Applications*. H. L. Thi, H. Le and T.P. Dinh, Eds. Cham : Springer, 2019. Pp. 37–47.
- [8] P. Knysh and Y. Krokolis. A procedure for parallel optimization of expensive black-box functions. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1605.00998.pdf>. (Accessed: October 15, 2023).
- [9] B. W. Barrett, E. Dwyer, and P. Whelan. Soil Moisture Retrieval from Active Spaceborne Microwave Observations: An Evaluation of Current Techniques. *Remote Sens.* 2009. Vol. 1. Pp. 210–242.
- [10] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, and M. A. El-Rayes. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* January 1985. Vol. GE-23. Pp. 35–46.
- [11] F. T. Ulaby, D. G. Long, and W. J. Blackwell et al. *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2013.
- [12] R. Bridson. Fast Poisson disk sampling in arbitrary dimensions. In *ACM SIGGRAPH 2007 sketches (SIGGRAPH '07)*, Association for Computing Machinery, New York, USA. 2007. Pp. 22-es.
- [13] W. Dorigo, W. Wagner, R. Hohensinn et al. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 15. Pp. 1675–1698.

Computer Modeling Wind Turbine Blades with Optimal Parameter

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.006>

Kyryl Degtyariv

A. Pidhornyi Institute for Mechanical Engineering
Problems NAS of Ukraine
Kharkiv, Ukraine
kdegt89@gmail.com

Elena Strelnikova

A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering
Problems NAS of Ukraine
Kharkiv, Ukraine
elena15@gmx.com

Olena Sierikova

Applied Mechanics and Environmental Technologies Department
National University of Civil Defence of Ukraine
Kharkiv, Ukraine
sierikova_olena@ukr.net

Abstract—The objective of this paper is to develop effective methods of weight optimization for wind turbine blades. New mathematical model based on the application of boundary element method is proposed. Hypersingular integral equations are used to determine the dynamic pressure on the blade. A new version of the nonlinear programming method, based on the usage of adaptive management of optimization procedures, is elaborated. As computer simulation results, the wind turbine blade is obtained with minimal weight.

Keywords—wind turbine blades; hypersingular integral equation; nonlinear programming; weight optimization.

I. INTRODUCTION AND LITERATURE REVIEW

Modern wind power plants are technical complexes consisting of a large number of interacting nodes and aggregates of various purposes. Among them, the main place is occupied by the vane system of the windmill. Optimal design of this type structures uses search procedures for determining the optimal set of parameters that satisfy the specified constraints and provide the best value of the accepted optimal criterion. Such procedures are well known [1], however, they have different effectiveness depending on changing conditions of the search process of the optimum, and it is not always possible, applying any of them separately, to achieve success in acceptable time. The proposed research uses an original hybrid optimization method. With its implementation, the multi-parameter problems of nonlinear programming are effectively solved, taking into account the system limit and functional restrictions [2].

Now a lot of methods are developed to estimate dynamic and strength characteristics of small wind turbines [3; 4]. Both for large and small turbine optimal designing, two types of computational techniques, namely, dynamic and strength analysis, and nonlinear programming are usually involved. For stress-strain analysis the finite [5] and boundary [6] element methods, finite volume methods [7], as well as

computational dynamics methods [8; 9] are effectively applied. The modern aspects of nonlinear programming are described in [10]. It should be noted that the numerical implementation of finite element and volume methods including turbulence models require essential computer time. It leads to difficulties when applying optimization procedures, that require a lot of an objective function and restrictions calculations.

So, in this paper two effective numerical techniques are used. First of them is hypersingular integral method with boundary elements implementation [11] for obtaining the blade dynamic characteristics, and second one is related to nonlinear programming [12]. Coupling these methods allows to elaborate new effective technique for optimal designing blades of wind turbine.

II. METODOLOGY

A. Problem Statement

To calculate the stress-strain state, the blade is modeled as a thin-walled naturally twisted rod of variable cross-section of length L , fixed to the wind turbine wheel [13]. Let us choose a coordinate system in which Z_G is the axis of rotation, X_G coincides with the axis of the wind wheel, Fig. 1. The Y_G direction is chosen so that the global coordinate system is right-handed. For stress-strain analysis of the blade, introduce a coordinate system (x, y, z) , with axes parallel to X_G, Y_G, Z_G , respectively, is introduced. The origin of coordinates is located at the section center of gravity. The blade geometry is represented by a set of sections. In each of them the following profile parameters are specified: coordinates (x, y) of the external contour, section thickness $h(z)$.

It is assumed that the blade is subjected to aerodynamic loads and centrifugal forces. The calculated aerodynamic load is reduced to distributed lateral loads q_x, q_y and distributed torque m_z . As an example, the blade with following characteristics is considered. The blade length including the extension is

$L = 19.13$ m. The elastic constants are taken as follows: modulus of elasticity of the extension $E_0 = 2 \cdot 10^5$ MPa, the elasticity modulus of the blade E varied from $4.92 \cdot 10^4$ up to $2.5 \cdot 10^4$ MPa; Poisson's ratio is $\nu = 0.18$, material density is $\rho = 1.6 \cdot 10^3$ kg/m³.

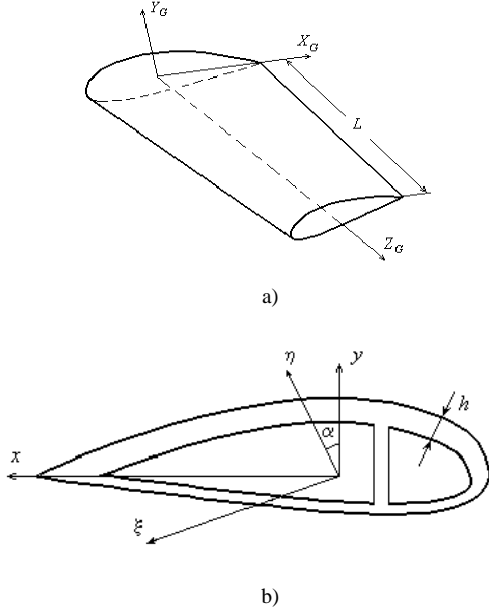


Figure 1. Blade model a) and its section b)

The speed of windmill rotation is $\Omega = 55$ rpm, the wind speed is 10 m/s. The number of blade sections is assumed to be equal to 65. The thickness in the blade sections varied in the root section at the edge from 5 to 2 mm, the thickness in the section of the extension cord is equal to 8 mm. The displacements and stresses distributions in the blades under of aerodynamic and centrifugal loads are estimated [13]. The stress distributions across the blade section and along z-axis are shown in Fig. 2a), b).

The air environment is assumed to be ideal, incompressible and vortex free. The problem of flow distribution around the blade can be reduced to solving a hypersingular integral equation. It allows us to determine the pressure fall along the blade. Aeroelasticity problem is solved in uncoupled formulation, i.e. deformations and displacements are considered to have any effect on the aerodynamic forces acting on the blade.

For optimal design of such structures, it is necessary to use procedures for minimizing (maximizing) some objective function by appropriately choosing project parameters under given restrictions. The restrictions themselves are functions of the initial parameters too.

Describe a possible formulation of the optimization problem for the wind wheel blade. It is required to find the blade of minimum weight under the following conditions. At stationary aerodynamic loads and centrifugal forces, normal displacement w should not exceed a given value $[w]$, stresses are restricted by the value $[\sigma]$, the first frequency of natural vibrations ω also has to be limited. Thus, for $i=1, \dots, N$ there are $|\max w^i| \leq [w], |\max \sigma^i| \leq [\sigma], [\omega_1] \leq \omega \leq [\omega_2]$. (1)

The objective function here is the blade mass $m = \rho V$, where ρ is the material density, V is the blade volume defined as

$$V = \sum_{i=1}^{N-1} \int_{z_i}^{z_{i+1}} S(z) dz, \quad (2)$$

where $S(z)$ is the cross-sectional area, $(N-1)$ is sections number.

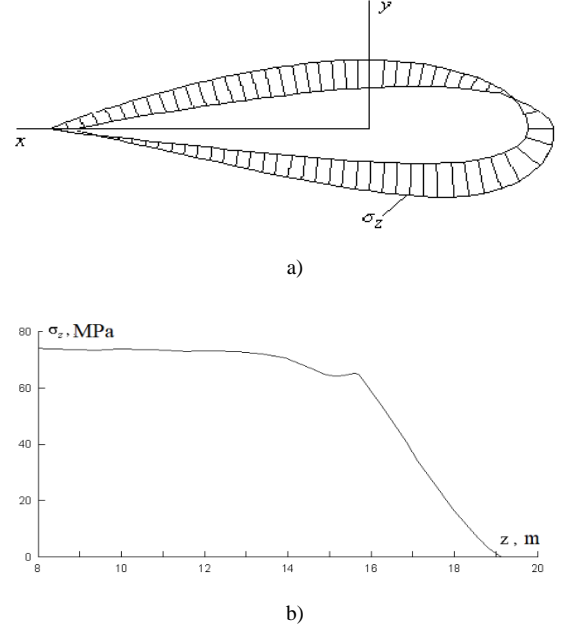


Figure 2. Stress distribution

The variable parameters here are the thickness of the blade in different sections $h_i(z), i = 1, \dots, N$.

Thus, the considered extremal problem (1) (2) is a nonlinear programming problem [2],[10] when it is necessary to find the vector

$$X^* = \arg \underset{X \in G}{\text{extr}} F(X) \quad (3)$$

$$F(X) = \rho \zeta$$

in the domain

$$G = \{X: G_i(X) \geq 0, i = \overline{1, m}\} \neq \emptyset \quad (4)$$

of the finite-dimensional parametric space E_n , delivering the extremum of the given objective function $F(X)$, defined in some extension of $H \supset G$.

B. Hypersingular Integral Equation Technique

To calculate aerodynamic loads, the blade is modeled by a bearing surface of finite dimensions S_1 . On this surface there is a vortex layer descending from the trailing edge in the form of a sheet of vortices S_2 , propagating in the direction \mathbf{V}_0 of the oncoming flow. In this case, the pressure drop ΔP across the blades is determined from the Cauchy-Lagrange integral, which in this case has the form

$$\frac{\Delta P}{\rho_0} = -(\text{grad} \Gamma \cdot \mathbf{V}_R), \quad (5)$$

where ρ_0 is the liquid density, Γ is the velocity circulation, and \mathbf{V}_R is the relative fluid velocity, $\mathbf{V}_R = \mathbf{V}_0 - \Omega \times \mathbf{r}$, \mathbf{r} is radius-vector of the point under consideration.

Consider the problem of flowing the ideal incompressible fluid around the thin load-bearing surface. Since the flow is considered irrotational everywhere outside the bearing surface S_1 and the vortex wake S_2 behind it, there exist a potential for the absolute fluid velocity, which satisfies the Laplace equation everywhere outside the discontinuity surfaces S_1 and S_2 . Require that the non-flow condition be satisfied on the bearing surface S_1 , as well the absence of pressure drop along the vortex wake S_2 . In addition, it is necessary to satisfy the condition of attenuation of perturbed velocities at infinity. The most acceptable solution representation to the described above problem for the Laplace equation is the double layer potential [14].

Aerodynamic loads are determined by solving the hypersingular integral equations using the boundary element method as described in [11]. The problem is reduced to solving the following hypersingular equation

$$\frac{1}{4\pi} \iint_S \Gamma(\mathbf{y}) \frac{\partial^2}{\partial n_x \partial n_y} \left(\frac{1}{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|} \right) dS_y = g(\mathbf{x}), g(\mathbf{x}) = (\mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x})) \quad (6)$$

Hypersingular integral equation (6) is solved by reducing to the following system of linear algebraic equations [11]

$$\sum_{k=1}^N H_{kj} \Gamma_k = g(\mathbf{x}_{0j}), j = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

where elements of the matrix H_{kj} are obtained by calculating the hypersingular integrals over boundary elements [14].

Note that over most blade part the stresses σ_z are almost constant, Fig. 2b). This result is obtained due to the variability of the cross-section parameters along the blade length.

C. Hybrid Optimization Method with Adaptive Control

For optimal design of complex multi-parameter objects of the type under consideration, it is convenient to use automatic hybrid search optimization method [1], applied to find the local optimal vector X^* of the conditional extremum problem, modeling, in particular, problem (1) – (4).

The analysis of optimization procedures and features of solving the optimal design problems shows that the simple accumulation of effective methods in the software library and even the introduction of an interactive solution mode, cannot provide the effective conditions for optimization. This is due to the fact that the task being implemented is not provided in advance with an appropriate set of attributes by which the control metaprogram would be able to identify the situation and assign the necessary method.

The essence of the proposed method is as follows. There are a number of hybrid methods that make up the hybrid coalition $\{M_i\}$. The criterion $Q(\sigma)$ is set, which determines during the process, which of the hybrids in given situation σ can be used to achieve the goal most effectively.

A control function $u = u(Q(\sigma))$ is introduced, which establishes an adaptive strategy for putting into operation a specific hybrid $M_k \in \{M_i\}$, $i = 1, \dots, k, \dots, s$ (or a group of methods-hybrids). The joint actions of

methods-hybrids ensure a more effective achievement of the goal than each of the hybrids of the coalition individually. This is achieved by introducing special adaptive control, which obtains vectors of minimizing sequences $\{X_{kr}\}$, search directions $\text{Dir } X_{kr}$, and search adaptive steps h_{kr} , in accordance with the changing situation σ .

In general, adaptive control u can be represented as

$$\left\{ \begin{array}{l} X_k^r \\ \text{Dir } X_k^r \\ h_k^r \end{array} \right\} = \sum_{i=1}^s u_i(Q(\sigma_k)) \left\{ \begin{array}{l} X_k^{M_i} \\ \text{Dir } X_k^{M_i} \\ h_{ki} \end{array} \right\},$$

$$\sum_{i=1}^s u_i(Q(\sigma_k)) = 1, \quad (8)$$

where $u_i(Q(\sigma_k))$ are non-negative control functions defined on the set $\{\sigma_k\}$ of situations, X_k^r , $\text{Dir } X_k^r$, h_k^r are the point, the direction emanating from this point, and the adapting search step generated by M_i method from the coalition $\{M_i\}$, respectively, k is an iteration number. The following modifications of methods were selected as hybrids M_i for this version of the hybrid optimization method: adaptive step-by-step descent, Abramov scheme, ravine modification, Hooke-Jeeves, Davidon-Fletcher-Powell methods, parallel tangent method, secant motion along the boundary of region G [10].

On each of the selected search directions, one-dimensional minimization of the objective function was carried out [12]. In [2] it is shown that the hybrid method can solve a wide class of problems much more efficiently than each of the abovementioned hybrids.

III. RESULTS AND DISCUSSION

To obtain an optimal design, the wind turbine blade with the following parameters was considered: $L = 4$ m, elastic modulus $E = 5 \cdot 10^5$ MPa, Poisson's ratio $\nu = 0.3$, material density $\rho = 1.6 \cdot 10^3$ kg/m³, wind wheel rotation speed $\Omega = 20$ rpm, wind speed 10m/s, $[\sigma] = 200$ MPa, frequency range $[\omega_1] = 0.1$ Hz, $[\omega_2] = 10$ Hz. The blade width varied from 1 m to 0.6 m.

In the process of solving the problem, the fields of displacements and stresses in the blade under aerodynamic loads are determined. The number of sections was taken equal to 28.

The maximum displacement in the plane of rotation of the wind wheel, normal to the OZ axis, is 28.5 cm, maximum bending stresses in the root section of the blade is 12.8 MPa, first frequency of natural oscillations is equal to 2.28 Hz. Table 1 shows the results of solving the optimization problem for the series blade sections Z_i . The initial values of thickness in sections h_0 and optimal parameters h^* are presented. In the initial version, the mass of the blade was equal to 19.38 kg.

As a result of optimization, the blade with weight equals to 16.64kg was obtained. The only active restriction was the blade movement. The natural frequency of oscillations was changed slightly during the counting process, this change did not violate the specified restrictions. Thus, methods for calculating aerodynamic loads and analyzing the stress-strain state of the wind turbine blades showed high efficiency and accuracy, which made it possible to formulate and solve optimization problem that requires repeated verification calculations. Using the developed in-house hybrid

adaptive method, the problem of weight optimization of wind turbine blades was solved.

TABLE I. INITIAL AND OPTIMAL PARAMETERS OF THE BLADE

Section Number	Coordinates and Thickness		
	Coordinate z, m	Initial Thickness, mm	Optimal Thickness, mm
1	0.800	6.0	5.04
2	1.236	5.6	4.73
3	1.818	5.0	4.21
4	2.400	4.4	3.67
5	2.836	4.0	3.25
6	3.564	3.2	2.41
7	4.000	3.0	2.19

IV. CONCLUSION AND FURTHER RESEARCH

An effective method for weight optimization of wind turbine blades has been developed.

The mathematical model has been developed to determine the air pressure on the wind turbine blade based on the method of hypersingular integral equations and namely the boundary element method for its numerical implementation. The unknown densities are supposed to be constants along the elements. The adaptive hybrid method of nonlinear programming is applied for solving the problem of weight blade optimization.

In this research the new version of the method for solving nonlinear programming problems has been developed, based on the use of a combination of various optimization methods, which are included in the process by introducing the adaptive control. The estimation of the blade of wind power plants was carried out, which allowed reduce its weight while meeting design and strength constraints.

The further research in the area will be concern with application of new innovative composite as materials for wind turbine blades producing [15]. It allows to design the blades of wind turbine with improved mechanical characteristics. The proposed approach will be also generalized to strength and dynamical analysis of wind turbines with a vertical axis of rotation [16] as well as their weight optimization.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are very grateful to our foreign collaborators, professors Alexander Cheng, Wessex Institute of Technology, and Jure Ravnik, Head of transport phenomena in fluid and solids laboratory, Maribor University for their continued support and cooperation.

REFERENCES

- [1] N. Smetankina, O. Semenets, A. Merkulova, D. Merkulov, and Misura. Two-Stage Optimization of Laminated Composite Elements with Minimal Mass / Smart Technologies in Urban Engineering, O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos and Y., Tsegelnyk, Eds. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham : Springer, 2023. Vol. 536. Pp. 456–465. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_42
- [2] V. I. Makeev, E. A. Strel'nikova, P. E. Trofimenko, et al. Selecting Design Parameters for Flying Vehicles. *Int Appl Mech*. 2013. Vol. 49. Pp. 588–596. <https://doi.org/10.1007/s10778-013-0592-8>
- [3] L. Battisti, E. Benini, A. Brighenti, S. Dell'Anna, and M. R. Castelli. Small wind turbine effectiveness in the urban environment. *Renew Energy*. 2018. Vol. 129. Pp. 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.062/>
- [4] O. Sierikova, E. Strelnikova, and K. Degtyariv. Numerical Simulation of Strength and Aerodynamic Characteristics of Small Wind Turbine Blades / Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2022, M. Nechyporuk, V. Pavlikov and D. Kritskiy, Eds. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham : Springer, 2018. Vol. 657. Pp. 357–370. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9_31.
- [5] L. Kolodiazhna, and Y. Bykov. Aeroelastic Characteristics of Rotor Blades of Last Stage of a Powerful Steam Turbine. *J. of Mech. Eng.* 2023. Vol. 26(1), Pp. 6–14. <https://doi.org/10.15407/pmach2023.01.006>
- [6] Q. Zang, J. Liu, L. Lu, and L. Gao. Boundary element analysis of liquid sloshing characteristics in axisymmetric tanks with various porous baffles. *Applied Ocean Research*. 2019. Vol. 93. 101963. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101963>.
- [7] A. Rusanov, A. Shubenko, O. Senetskyi, O. Babenko, and R. Rusanov. Heating modes and design optimization of cogeneration steam turbines of powerful units of combined heat and power plant. *Energetika*. 2019. Vol. 65(1). Pp. 39–50. DOI.org/10.6001/energetika.v65i1.3974
- [8] S.N.A. Yusof, Y. Asako, N.A.C. Sidik, S.B. Mohamed, W. Mohd, A. A. Japar. A short review on RANS turbulence models. *CFD Letters*. 2020. Vol. 12(11). Pp. 83–96. 10.37934/cfdl.12.11.8396
- [9] D. Mastrodicasa, E. Di Lorenzo, S. Manzato, and P. Guillaume. Full-field modal analysis by using digital image correlation technique. *Rotating Machinery, Optical Methods & Scanning LDV Methods*. 2022. Vol. 6. Pp. 119–130. 10.1007/978-3-030-76335-0_10
- [10] A. E. Sameh. Nonlinear Modeling, Analysis and Simulation of Wind Turbine Control System With and Without Pitch Control as in Industry. *Advanced Control and Optimization Paradigms for Wind Energy Systems*. Singapore: Springer, 2019. Pp. 1–40. DOI: 10.1007/978-981-13-5995-8_1.
- [11] A. Karaiev, and E. Strelnikova. Singular integrals in axisymmetric problems of elastostatics. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. 2020. Vol. 11(1). 2050003. DOI:10.1142/S1793962320500038.
- [12] G. Sheludko, and S. Ugrimov. The localization method of extremum point for unimodal function. *Journal of Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 19, no. 1. Pp. 43–54. DOI: 10.15407/pmach2016.01.044.
- [13] R. Rzadkowski, V. Gnesin, and L. Kolodyazhnaya. Aeroelasticity Analysis of Unsteady Rotor Blade Forces and Displacements in LP Last Stage Steam Turbine with Various Pressure Distributions the Stage Exit. *J. Vib. Eng. Technol*. 2018. Vol. 6. Pp. 333–337. <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0049-9>
- [14] V. Gnitko, A. Karaiev, K. Degtyariv, I. Vierushkin and E. Strelnikova. Singular and hypersingular integral equations in fluid–structure interaction analysis. *WIT Transactions on Engineering Sciences*. vol. 134, 2022, pp. 67–79. DOI:10.2495/BE450061.
- [15] O. Sierikova, V. Koloskov, K. Degtyarev, and O. Strelnikova. The Deformable and Strength Characteristics of Nanocomposites Improving. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. Pp. 144–153. doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.144.
- [16] F. A. Khammas, K. Hussein Suffer, R. Usubamatov, and M. T. Mustafa. Overview of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) is one of the Wind Energy Application. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 793. Pp. 388–392. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.793.38>

Unemployment and Problems of Employment in an Economically Less Active

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.007>

Ibraim Didmanidze
Batumi Shota Rustaveli State University
Batumi, Georgia
ibraimd@gmail.com

Ia Motscobili
Batumi State Maritime Academy
Batumi, Georgia
i.motscobili@bsma.edu.ge

Manana Didmanidze
Batumi Shota Rustaveli State University
Batumi, Georgia
mdidmanidze92@gmail.com

Zurab Zakaradze
Georgian Technical University
Tbilisi, Georgia
kancelaria6@gmail.com

Abstract—Unemployment is one of the most important problems in the world. It hinders the socio-economic development of the country, hinders the improvement of the standard of living of the population. In the economic literature, special attention is paid to the analysis of the economic and social consequences of unemployment. Unemployment gives rise to several problems of particular acuteness. Among them is the problem of social inequality.

Keywords—employment problems, market economy, unemployment, number of unemployed.

I. INTRODUCTION

Unemployment causes more than one socio-economic problem, including: the dequalification of workers, the growth of poverty, shattering the psyche of people, a drop in morale, suicide, an aggravation of the crime situation, a decline in marriage and fertility, an increase in the number of divorces and the number of deaths.

Unemployment, and especially chronic unemployment, has quite negative socio-economic consequences for society, which is adequately reflected in the standard of living of the population and the process of economic development of the country. Therefore, in international practice, serious attention is paid to the assessment of these negative socio-economic consequences. It is relatively easy to assess the economic consequences of unemployment, while the social consequences, which are difficult to distinguish and are complex and cannot be fully evaluated. The negative consequences of unemployment and the degree of its impact on socio-economic development depend on the situation in the country, on the specific parameters of the social situation.

To fight unemployment, we must first analyze its causes. There are many reasons for the emergence of unemployment: the transformation of the economy, the economic downturn, the mistakes made during economic reforms, the introduction of innovations, the high level of corruption, the presence of imperfect institutions, the difficult political and criminogenic situation, etc.

II. MAIN PART

To eliminate economic inequality, it is necessary to carry out systemic reforms both in the field of education and in agriculture. It is necessary to increase economic opportunities, the quality of education and access to retraining, and create an environment in which all stakeholders, including government, civil society, the private sector, and citizens, will be involved in the process of sustainable development, because this is a complex problem, and it is practically impossible for one single sector to solve it. Unemployment causes an economic crisis and reduces people's purchasing power, leading to poverty. Unemployment and poverty are more relevant in less developed countries, however, due to current economic problems at the global level, this problem has become relevant for developed countries as well. Unemployment and poverty are so complex that they are directly correlated with each other, and as the unemployment rate decreases, so does the poverty rate, but overcoming the problem of unemployment should be carried out on the basis of an individual action plan for all countries and, moreover, for all regions [1].

We focus on one of the problems in the field of employment, namely the shadow part of the employment market. People employed in the shadow part of the labor market avoid mandatory taxes for employees in the country, whose income can be much higher than the income of many taxpayers, however, in most cases, the income of people employed in the shadow part of the labor market is below average, and they might be using various types of social assistance and benefits. Most, but not all, people in the informal labor market are low-paid, low-skilled workers. In addition to the fact that the presence of the shadow part of the labor market causes errors in the significant statistical data of the country, the country's economy loses income in the form of hidden taxes.

It is important that in order to improve the quality of the institutionalization of job search, it is not enough to create Internet portals, regularly organize forums and employment weeks. It is necessary to accelerate the creation of a network of employment promotion centers, which is also provided for by the state strategy for the

formation of the labor market. There is a Public Service Bureau. The Public Service Bureau is a legal entity of public law, the purpose of which is to develop the administrative and legislative policy of public administration in the country and to implement the principles of effective public administration. The Bureau carries out the improvement of the legal framework of the public service, the improvement of human resource management systems of the public service and the implementation of e-government projects [2].

One of the most common and effective ways to combat structural unemployment is the preparation and conduct of training courses by the state. This will help improve the skills of the unemployed and increase their competitiveness. In this way, the level of professional and qualification training of the workforce will be in line with the requirements of the workplace.

To prevent a rise in the unemployment rate, it is important to take a number of measures:

- Management Improvement – to eliminate the vicious practice of mass layoffs of old employees and joining the state with "his own team" as a sign of gratitude for the personal loyalty of "this team" when changing managers-employees in government structures.
- Protection of the rights granted to workers by law – in this direction it is necessary to strengthen trade unions. Executive authorities must respond quickly and objectively to violations of the Labor Code.
- Development of an anti-dumping law. Dumping serves to drown local producers, so it causes serious damage to small businesses and, as a result, increases the unemployment rate. Therefore, it is necessary that the state actively fight against dumping prices in order to protect the manufacturer as much as possible.
- Improving the system of labor protection and protection of rights – the right to life and health of workers, as one of the fundamental rights, is guaranteed by the Constitution of Georgia and a number of international documents. The right to work includes the right of workers to ensure the safest and healthiest working conditions possible and to protect the rights granted to them by labor legislation.
- Regulation of labor migration – according to the state migration strategy, it is necessary to create a legal and institutional environment to improve the emigration environment. Its goals are: promotion of legal migration; fight against illegal migration; promoting the reintegration of returned migrants; Improving migration management and raising public awareness.

There are two main methods for determining the number of unemployed:

1. The unemployment rate is determined on the basis of selective observations of a certain part of the population, which is conducted periodically;
2. The unemployment rate can be determined on the basis of applications submitted for the status of unemployed in the state employment services.

Duration of unemployment – The period of unemployment of an economically active person can be different. The most short-term is friction unemployment,

which can usually last for weeks or months. Structural unemployment lasts longer than friction [3].

It is true that the negative socio-economic consequences of unemployment are pronounced and are mostly assessed negatively by specialists, but, like all events, unemployment has, along with negative, positive aspects in terms of its impact on the labor market. In particular, the presence of a certain level of unemployment leads to:

- ✓ the constant maintenance of the labor reserve;
- ✓ the competition among workers;
- ✓ the stimulation of productivity and labor intensity;
- ✓ increasing the social significance and role of labor in society;
- ✓ increasing the social status of the employee; the freedom of choice of workplace, etc.

I.CONCLUSION

The main indicators of unemployment are: the number of unemployed; duration of unemployment; unemployment rate; the sex-age structure of unemployed; professional-qualified structure of unemployed; sectoral and territorial structure of unemployed.

The formation of the natural level of unemployment can be affected by many factors, such as economic growth rates, demographic development trends, the emigration-immigration situation of the country, changes in the structure of the labor force, etc. Since the above figures are different in different countries, it is not surprising that every country has a different natural level of unemployment.

REFERENCES

- [1] I. Didmanidze, M. Didmanidze, O. Yamkova, and T. Didmanidze. About employment problems in the region. IV international scientific and practical conference «modeling, control and information technologies. *Proceedings of IV International scientific and practical conference Modeling, control and information technologies* (Rivne, November 5–7, 2020, MCIT-2020). Rivne : NUWEE, 2020. Vol. 4. Pp. 124–125.
- [2] I. Didmanidze, I. Motskobili, M. Didmanidze, T. Didmanidze, and Z. Zakaradze. Employment problems among young specialist in the region. *XXXV international conference Problems of decision making under uncertainty* (Baku-Sheki, May 11–15, 2020. PDMU-2020). Baku-Sheki. Pp. 36–37.
- [3] I. S. Didmanidze, I. R. Motskobili, and M. I. Didmanidze. Ensuring effective governing for regional development. *Proceedings of 9th International scientific-practical conference Computer simulation and control in technics and technologies* (Kyiv, May 12–14, 2021, CSCTT-2021). Kyiv : KPI, 2021. Pp. 35–38.

Methods for simplifying mathematical models of dynamical systems

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.008>

Viktor Gorodetskyi

Educational and scientific institute of energy saving and energy management
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine
v.gorodetskyi@ukr.net

Mykola Osadchuk

Educational and scientific institute of energy saving and energy management
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine

Abstract—We consider the problem of simplifying a system of ordinary differential equations obtained as a result of reconstruction from a single observed variable. To solve the problem, we propose two methods: analytical and numerical-analytical. Both methods were applied to a third-order system of ordinary differential equations with polynomial right-hand sides and the results of the methods were compared.

Keywords—dynamical system; time series; model simplification; analytical method; numerical-analytical method.

I. INTRODUCTION

The problem of identifying a system of ordinary differential equations (ODE) from time series of observed variables [1] is often occurred in nonlinear dynamics. One of the special cases of this problem is the reconstruction problem, i.e. identification of an ODE system based on one observed variable. If only numerical methods are used for reconstruction (for example, the Bock's algorithm [2]), then the result can be an ODE system containing redundant terms that have no physical meaning. In such a situation, the task of simplifying the ODE system may arise. Methods for solving this problem are discussed in this paper.

II. FORMULATION OF THE PROBLEM

We assume that the ODE system reconstructed by the numerical method has the form

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_1x_2 + a_6x_1x_3 + a_7x_2^2 + a_8x_2x_3 + a_9x_3^2, \\ \dot{x}_2 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_1x_2 + b_6x_1x_3 + b_7x_2^2 + b_8x_2x_3 + b_9x_3^2, \\ \dot{x}_3 = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_1^2 + c_5x_1x_2 + c_6x_1x_3 + c_7x_2^2 + c_8x_2x_3 + c_9x_3^2, \end{cases} \quad (1)$$

where $a_i, b_i, c_i, i = 0, \dots, 9$, are constants, x_1 – observed variable. According to [3], a system that precisely describes the dynamics of a studied process will be called the original system (OS). We will assume that the general form of the OS equations and the numerical values of the coefficients were obtained using one of the

well-known numerical methods and some of the coefficients of the equations are redundant. Even if some of the found coefficients of OS (1) will have values close to zero, this would not mean that these coefficients can be neglected, since it could sometimes lead to a significant error. Since the structure of the system (1) may be not optimal due to containing redundant terms, we will call it unoptimized original system (UOS). One needs to find instead of UOS another system that we will call a minimized original system (MOS). It has the form

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = P_1(x_1, x_2, x_3), \\ \dot{x}_2 = P_2(x_1, x_2, x_3), \\ \dot{x}_3 = P_3(x_1, x_2, x_3), \end{cases} \quad (2)$$

where P_1, P_2, P_3 are polynomials, like in system (1), but the total number N_{MOS} of nonzero coefficients in the right-hand sides of system (2) is subject to the condition $N_{MOS} < N_{UOS}$, where N_{UOS} is the total number of nonzero coefficients in the UOS. In the process of simplifying the UOS equations, the auxiliary type of ODE systems proposed in [3, 4] will be used. We will call a differential model (DM) [1] a system of ODEs of the form

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, \\ \dot{y}_2 = y_3, \\ \dot{y}_3 = F(y_1, y_2, y_3), \end{cases} \quad (3)$$

where F is a polynomial function or a ratio of polynomials. In this case, the observed variable DM y_1 coincides with the observed variable OS, and all DM coefficients can be analytically expressed through OS coefficients. This fact allows us to formulate an obvious statement used in [5; 6]: two different original systems, which have the same observable, have the same DM that was obtained from this observable. This statement permits to vary coefficients of the OS in such a way that the coefficients of the DM would remain unchanged. Taking into account the above, two methods can be proposed to simplify the UOS structure – the analytical method [7] and the numerical-analytical one [8].

III. THE ANALYTICAL METHOD

The analytical method for simplifying the UOS structure [7] uses analytical relationships between the OS and DM coefficients as follows. To simplify the structure of the UOS, it is sufficient to make some of its coefficients equal to zero and to change values of the remaining coefficients in such a way that the DM that corresponds to the MOS would coincide with the DM corresponding to the UOS. To do this, all UOS coefficients can be divided into three sets – uniquely determined, preset and adjustable. Uniquely determined coefficients can be analytically expressed in terms of DM coefficients, so they cannot be excluded from the UOS equations. Adjustable coefficients can be expressed in terms of DM coefficients, uniquely determined and predefined UOS coefficients. Therefore, when changing the values of the preset coefficients, the adjustable coefficients will change so that the DM coefficients remain unchanged. Thus, simplifying the UOS equations can be done in the following sequence:

- 1) To get analytic relations between coefficients of the DM and coefficients of the UOS.
- 2) Separate the set of uniquely determined coefficients of the UOS using analytic relations.
- 3) Make an analysis of relations for coefficients for the DM and obtain relations that define adjustable coefficients of the UOS in terms of coefficients of the DM, uniquely determined coefficients and preset coefficients of the UOS.
- 4) Obtain values of the coefficients of the MOS by substituting, into the relations obtained in Step 3, values of the coefficients of the DM, the uniquely determined coefficients of the UOS, and zeros for the preset coefficients.
- 5) Find the initial values of the variables in MOS so that its observable coincides with the observable in the UOS.

Let us remark that choice of different sets of preset coefficients could lead to MOSs with different structures.

The analytical method was applied to simplify system (39) from [9] that was obtained from Lorenz system [10] using the “Ansatz library” method. The system contains $N_{UOS} = 21$ coefficients, instead of 7 coefficients as in the Lorenz system. This Lorenz-like system has the form

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_4x_1^2, \\ \dot{x}_2 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_1x_2 \\ \quad + b_6x_1x_3 + b_7x_2^2, \\ \dot{x}_3 = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_1^2 + c_5x_1x_2 \\ \quad + c_6x_1x_3 + c_7x_2^2 + c_8x_2x_3 + c_9x_3^2. \end{cases} \quad (4)$$

The variable x_1 was taken as an observable. A DM that corresponds to OS has the form of a fractional rational function with 35 coefficients in the numerator and 1 coefficient in the denominator. The values of the DM coefficients were analytically calculated based on the values of the UOS coefficients. The analytical method outlined above was then applied. It was found that in system (4) there is only one uniquely determined coefficient – a_2 . Coefficients a_0, b_1, b_2, b_4, c_8 were taken

as preset coefficients. Resetting these coefficients to zero allowed us to obtain MOS with $N_{MOS} = 16$ coefficients. Wherein we set to zero the preset coefficients with different values, for example, $b_2 = 11.617$. Hence, this approach permits to set to zero not only small coefficients of the UOS.

A comparison of the time series x_1 for the UOS and the MOS has been carried out. For this purpose, the initial conditions UOS and MOS were chosen at which their observed variables coincide and both systems were integrated over an interval of 50 s with a sampling step of 0.001 s. To estimate the degree of coincidence, we calculate the value of coincidence time, t_c , for which the time series for $x_1(t)$ and $x'_1(t)$ in the UOS and the MOS, correspondingly, differ by no more than Δ ,

$$t_c = \max \{ t : \forall \tau < t, |x_1(\tau) - x'_1(\tau)| < \Delta \}. \quad (5)$$

The Δ value was 10% of the range of the time series in the UOS (4). With such a Δ , we have obtained $t_c = 32.916$ s. The discrepancy between the time series may be explained by chaotic character of the time series and numerical errors.

To make a comparison, we have considered the structure optimization procedure for UOS (4) in the case of periodic oscillations. To get periodic oscillations, we changed value of a_1 with other coefficients of the UOS remaining unchanged. As a result of simplifying UOS, MOS was obtained with the same structure as in the previous example, but with different coefficient values. Integrating this MOS resulted in $t_c = 50$ s, that is, the time series coincided with acceptable precision on the entire integration interval. This example confirms that the main reason for the deviation of the UOS and the MOS time series is the chaotic nature of the oscillations.

As we have mentioned before and that can be seen from the given procedure, it uses no numerical methods. No numerical methods are also used when getting to the OS from the DM. This fact makes the proposed approach different from the Ansatz library method, where one uses a numerical procedure “to invert the maps between the differential models and corresponding ansatz models” [11].

IV. THE NUMERICAL-ANALYTICAL METHOD

The numerical-analytical method for simplifying the structure of UOS [8] is based on the idea that MOS can be obtained if we assume an approximate, rather than exact, coincidence of the time series of observed variables UOS and DM. In this case, the DM may have a simpler structure and can correspond to a MOS with fewer terms in the equations. To obtain an approximate DM, you can use the numerical method [4], which allows you to obtain numerical values of the DM coefficients from the time series of the observed variable UOS. As a measure of the coincidence of the time series $x_1(t)$ and $y_1(t)$ UOS and DM, respectively, the relative root mean square was used:

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} (y_1(j\Delta t) - x_1(j\Delta t))^2}}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} (x_1(j\Delta t))^2}}, \quad (6)$$

where m is the number of time series points; Δt is the sampling step of the time series.

The detailed implementation of the numerical-analytical method is as follows:

1) According to the time series of the observed UOS variable, perform a numerical reconstruction of the DM. During numerical reconstruction, in addition to the values of the DM coefficients, their significance [11] is also calculated which is determined by the formula

$$\alpha_k = \frac{|M(N_k)|}{\sigma(N_k)}, \quad (7)$$

where $M(N_k)$ and $\sigma(N_k)$ are the mean value and root mean square of the DM coefficient N_k , respectively. The significance value is used to identify which coefficients are present (or absent) in the DM equations. Higher values of α_k correspond to the coefficients that are present in DM.

2) Simplify the DM structure using the significance values of its coefficients.

3) If the DM structure obtained in Step 2 by the numerical method does not correspond to the DM structure obtained analytically, then the structure from Step 2 must be made corresponding to the analytical one. Namely, it is necessary to add or remove a coefficient from DM, regardless of its significance, calculated in Step 2, otherwise the analytical transition from OS to DM will become impossible. That is, it will be impossible to obtain a relations connecting the DM and the OS coefficients.

4) Reduce the number of DM and OS coefficients by repeating Steps 1-3 until δ (6) is within acceptable limits.

5) Perform an analytical transition from a simplified DM to an OS that can be used as a MOS.

The numerical-analytical method was applied to UOS (4) To obtain a time series of the observed variable $x_1(t)$, the system was integrated over an interval of 20 s with a sampling step of 0.002 s. Using the time series, a numerical method was used to obtain a DM with 36 coefficients, for which $\delta = 0.29\%$. Simplification of the DM in accordance with Steps 1-3 of the proposed sequence of actions made it possible to consistently obtain a DM with 15 coefficients ($\delta = 0.77\%$), 11 coefficients ($\delta = 2.82\%$) and 12 coefficients ($\delta = 2.45\%$). The last DM corresponds to MOS with $N_{MOS} = 9$ coefficients – $a_2, b_1, b_2, b_6, b_7, c_3, c_4, c_5, c_7$. When integrating MOS, a time series of its observable $x'_1(t)$ was obtained, for which the value of coincidence time (5) was $t_c = 3.7$ s. After specifying the initial MOS conditions, the time series $x_1(t)$ was obtained, for which $t_c = 20$ s.

V. COMPARISON OF METHODS FOR SIMPLIFYING THE UOS STRUCTURE

The considered methods are intended to simplify the structure of the equations of the ODE system obtained by reconstruction from the time series of one observed variable. Unlike most reconstruction methods, the considered methods use information about the equations and values of the UOS coefficients, rather than time series, as input data. This allows the researcher to simplify the UOS, which has been obtained in the past by other researchers and for which time series are not available. To apply both methods, the following conditions must be satisfied: an ODE system contains (presumably) excess terms and it is possible to pass analytically to a DM from the OS.

The analytical method allows to researcher to obtain a MOS for which the observed variable is proven to coincide with the observed variable UOS. Therefore, using the analytical method, it is possible to exclude even coefficients with large absolute values from the UOS equations without loss of precision, which can be important in the case of chaotic systems. Another advantage of the analytical method is that, in general, several MOS structures can be obtained. Then it is possible to choose the one from them, based, for example, on the physical meaning of the equations.

The numerical-analytical method allows to researcher to obtain MOS with fewer coefficients than in the case of using the analytical method. In this case, MOS only approximately reproduces the observed UOS time series. The numerical-analytical method is intended for cases where it is acceptable for MOS to correctly reproduce a time series over a shorter time interval than UOS.

REFERENCES

- [1] L. A. Aguirre, and C. Letellier. Modeling nonlinear dynamics and chaos: a review. *Mathematical Problems in Engineering*. 2009. article ID 238960. Vol. 2009. 35 p.
- [2] E. Baake, M. Baake, H. G. Bock, and K. M. Briggs. Fitting ordinary differential equations to chaotic data. *Physical Review A*. 1992. Vol. 45. Pp. 5524–5529.
- [3] G. Gouesbet. Reconstruction of standard and inverse vector fields to a Rössler system. *Physical Review A*. 1991. Vol. 44 (10). Pp. 6264–6280.
- [4] G. Gouesbet. Reconstruction of the vector fields of continuous dynamical systems from numerical scalar time series. *Physical Review A*. 1991. vol. 43 (10). Pp. 5321–5331.
- [5] C. Lainscsek. A class of Lorenz-like systems. *Chaos*. 2012. article ID 013126. Vol. 22.
- [6] V. Gorodetskiy, and M. Osadchuk. Analytic reconstruction of some dynamical systems. *Phys. Lett. A*. 2013. Vol. 377. Pp. 703–713.
- [7] V. Gorodetskiy, and M. Osadchuk. Simplification of a reconstructed model. *International Journal of Dynamics and Control*. 2019. Vol. 7 (4). Pp. 1213–1224, DOI: <https://doi.org/10.1007/s40435-019-00579-w>
- [8] V. Gorodetskiy, and M. Osadchuk. Solving the problem of mathematical models overparameterization for some nonlinear oscillating systems. *System research and information technologies*. 2021. Vol. 3. Pp. 135–148. DOI: <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.3.11>
- [9] C. Lainscsek, C. Letellier, and F. Schürer. Ansatz library for global modeling with a structure selection. *Physical Review E*. 2001. article ID 016206. Vol. 64. 15 p.
- [10] E. N. Lorenz. Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci*. 1963. Vol. 20. Pp. 130–141.
- [11] C. Lainscsek, C. Letellier, and I. Gorodnitsky. Global modeling of the Rössler system from the z-variable. *Physics letter A*. 2003. Vol. 314. Pp. 409–427.

On the problems of determining the trajectory of an aerial vehicle based on inertial navigation system data

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.009>

Arif H.Hasanov

Military Scientific-Research Institute of National
Defense University
Baku, Azerbaijan
arif.h.hasanov@gmail.com

Adalat B.Pashayev

Institute of Control System,
National Defense University
Baku, Azerbaijan
adalat.pashayev@gmail.com

Elkhan N.Sabziev

Institute of Control System,
National Defense University
Baku, Azerbaijan
elkhan.sabziev@gmail.com

Abstract—Navigation in military UAVs requires the use of onboard inertial systems. An approach is proposed for noise filtering, refinement of initial and intermediate values when applying calculation algorithms based on the estimates of loads and angular velocity taken from sensors.

Keywords—inertial navigation system; accelerometer; gyroscope; orientation angles; aerial vehicle; trajectory.

I. INTRODUCTION

The introduction of advanced technologies in electronics and materials science has led to the development of various types of UAVs and their widespread use in the military. Civilian applications of UAVs require stable communication. Satellite navigation systems such as GPS, GLONASS and others can also be used to determine the current location. In military applications, the limitations of communication and satellite navigation systems become apparent. Therefore, one of the main problems faced by UAV control system developers is the problem of UAV self-location in the absence of a GPS system. As is known, one way to solve problems of this type is by processing the inertial navigation data of the aerial vehicle. This approach involves equipping the vehicle with an accelerometer and gyroscope system. When classical inertial navigation systems are used, the initial position is input by the operator (pilot), the accelerometer measures loads on the ground or on the aerial vehicle (vector components expressing the ratio of the force acting on the vehicle to its weight), and the gyroscope measures rotation angles (e.g., [1, 2]). For both civilian and military aircraft, orientation-related information is entered into the system at the apron where it is parked before takeoff.

For the purpose of this paper, a UAV is defined as an airplane-type fixed-wing unmanned aerial vehicle.

Today, unmanned aerial vehicles are launched from pads that undergo no special preparation. One of the most common navigation sensors used in UAVs is MPU6000 [3]. Navigation sensors used in some cases measure not orientation angles, but their rate of change (e.g., MPU6050 [4]). Sensors of this type also have constant measurement data errors. Such sensor errors present no particular problems in the visual control of commonly used short-range quadcopters or hexacopters. UAVs of this type are also equipped with magnetometers for determining the directions of the horizon.

The above characteristics require an adequate data processing algorithm to control a relatively long-range (40÷50 km) UAV with wing dimensions within 3.0÷5.0 m.

The paper describes the proposed approach to finding the values used to calculate the flight path of a winged aerial vehicle equipped with a magnetometer and a MPU6000-type sensor.

Note that when analyzing a flight within a range of 50-100 km, the curvature of the Earth can be ignored, so the mathematical apparatus below is given for rectangular coordinate systems.

II. COORDINATE SYSTEMS USED, DESCRIPTION OF QUANTITIES

It is convenient to use a UAV-fixed local coordinate system $Oxyz$ (Fig.1) to analyze the forces and moments acting during flight simulation, and an Earth-fixed rectangular coordinate system $O_g g g g$ (Fig. 2) to describe the trajectory. We introduce the respective coordinate systems.

We will assume that in the UAV-fixed coordinate system, the origin of coordinates g is at the center of gravity of the vehicle, with the axis Ox oriented along the fuselage of the vehicle and the axis Oz oriented

perpendicular to it in the direction of the right wing. The axis Oy is perpendicular to the plane Oxz so that the coordinate system $Oxyz$ is positively oriented.

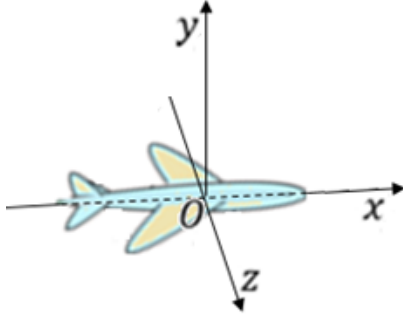


Figure 1. UAV-fixed coordinate system.

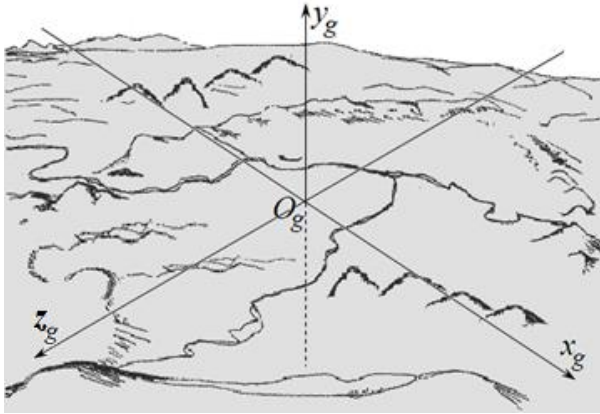


Figure 2. Earth-fixed coordinate system.

For simplicity, the origin of the Earth-fixed rectangular coordinate system O_gXYZ is identified with the starting point of the UAV trajectory, with the axis O_gX oriented upward perpendicular to the Earth's surface. We point the axes O_gX and O_gZ so that O_gXYZ is positively oriented. For definiteness, we assume that the axis O_gX is oriented northward.

The coordinates of the UAV during flight are set relative to the system O_gXYZ .

The spatial position of the UAV is determined by the position of the coordinate system $Oxyz$ relative to the system O_gXYZ (Fig.3). The orientation angles ψ, θ, γ are used for this purpose.

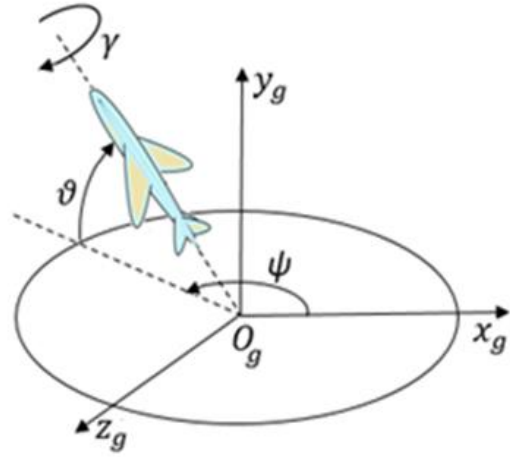


Figure 3. Orientation (Krylov) angles.

ψ is the yaw angle – the angle between the axis O_gX of the coordinate system O_gXYZ and the projection of the axis Ox on the plane O_gXY ; θ is the pitch angle – the angle between the axis Ox and the plane O_gXZ ; γ is the roll angle – the angle between the axis Oz and the axis O_gZ [5].

Note that the following matrix A can be used to calculate the coordinates of a vector given in the system O_gXYZ relative to the system $Oxyz$ [6]:

$$A = \begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & S_\theta & -C_\theta S_\psi \\ -C_\gamma S_\theta C_\psi + S_\gamma S_\psi & C_\gamma C_\theta & C_\gamma S_\theta S_\psi + S_\gamma C_\psi \\ S_\gamma S_\theta C_\psi + C_\gamma S_\psi & -S_\gamma C_\theta & -S_\gamma S_\theta S_\psi + C_\gamma C_\psi \end{bmatrix},$$

where for simplicity $C_\xi \equiv \text{Cos}\xi$, $S_\xi \equiv \text{Sin}\xi$.

III. INITIAL PROCESSING OF SENSOR DATA

Data from MPU6000 sensors, designed for a wide range of applications, can be retrieved in various frequency ranges (1÷100 Hz). As a rule, depending on the inertia characteristics of the object of study, the optimal frequency of data retrieval required is determined at the stage of UAV design. The choice of high frequency increases the time of data processing, overloading computing resources. On the other hand, if a low frequency is chosen, data received may be insufficient to calculate the trajectory with the required accuracy.

It should also be noted that loads and angular velocities measured along different axes are measured successively, but are referenced to the same time instant. Therefore, the values of these quantities transmitted by the sensor to the system at a given instant may differ slightly from the real values.

Fig. 4 and 5 show examples of sensor data collected for a UAV at rest. Analysis of these data shows that even in the absence of motion, if the loads vary in a range close to the real values, the angular velocities vary in a range of non-zero values. Thus, when using MPU6000 sensors for flight data retrieval, the *problem of optimal frequency selection and initial data processing* arises.

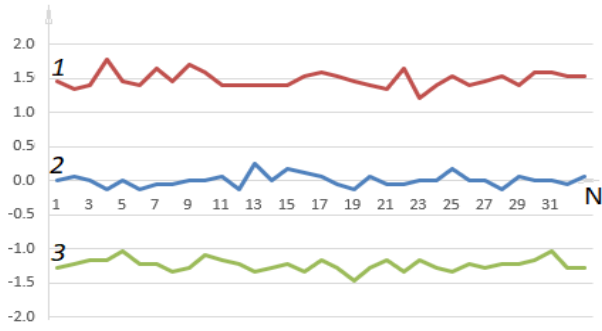


Figure 4. Graph of pitch (1), yaw (2) and roll (3) angular velocities at rest vs. time, with the time instants (s) when measurements are taken indicated along the horizontal axis, and angular velocities along the vertical axis (degree/s).

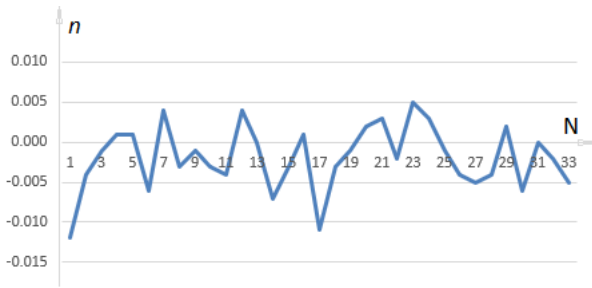


Figure 5. Graph of variation of the load on the axis Ox at rest vs. time, with the time instants (s) when measurements are taken indicated along the horizontal axis, the value of the load along the vertical axis.

Based on numerous experiments conducted with the inertial characteristics of medium-sized winged UAVs, the choice of a measurement frequency of 10 Hz was deemed satisfactory. On the other hand, it is sufficient that the system of differential equations describing the trajectory be solved at 1-second increments.

A procedure similar to the practice of entering aircraft initial data into the navigation system at the preflight apron is proposed. For example, an UAV mounted on the pad and preparing for flight does not move for the first 10÷15 seconds. We denote this period by T . Suppose that the measurements were taken at the time instants $t_i = i \cdot \Delta t, i = 0, 1, \dots, N, N = [T/\Delta t]$.

Accordingly, we take $\Delta t = 0.1 \text{ s}$. Denote the angular velocities received from the MPU6000 sensor during this time by $\psi'_i, \theta'_i, \gamma'_i$. Then the corresponding average sensor values in the period T for these quantities can be calculated as follows:

$$\begin{cases} \psi'_* = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \psi'_i, \\ \theta'_* = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \theta'_i, \\ \gamma'_* = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \gamma'_i. \end{cases}$$

Since the values $\psi'_*, \theta'_*, \gamma'_*$ are the preflight sensor values of the quantities under consideration, it is obvious that they must correspond to the real zero

values. Therefore, the values of angular velocities for the subsequent period are reduced to the values $\psi'_*, \theta'_*, \gamma'_*$.

To denote the values of angular velocities and loads measured at the time instants $t_{j-1} + 0.1 \times k$ at a frequency of 10 Hz in the interval $[j-1, j]$, we introduce the index $\{j\}_k, (k = 1, 2, \dots, 10)$. The following formulas (filters) are proposed to calculate the value of these quantities:

$$\begin{cases} \tilde{\psi}'_j = 0.1 \cdot \sum_{k=0}^9 \psi'_{\{j\}_k} - \psi'_*, \\ \tilde{\theta}'_j = 0.1 \cdot \sum_{k=0}^9 \theta'_{\{j\}_k} - \theta'_*, \\ \tilde{\gamma}'_j = 0.1 \cdot \sum_{k=0}^9 \gamma'_{\{j\}_k} - \gamma'_*, \\ \tilde{n}_{x,j} = 0.1 \cdot \sum_{k=0}^9 n_{x,\{j\}_k}, \\ \tilde{n}_{y,j} = 0.1 \cdot \sum_{k=0}^9 n_{y,\{j\}_k}, \\ \tilde{n}_{z,j} = 0.1 \cdot \sum_{k=0}^9 n_{z,\{j\}_k}. \end{cases}$$

IV. CALCULATING THE INITIAL ORIENTATION

The UAV trajectory is calculated by integrating its motion equations, and the correct calculation of this trajectory depends on the initial position. While incorrect determination of the initial coordinates causes a shift of the calculated UAV trajectory parallel to the real trajectory, incorrect assignment of the initial values of the orientation angles expressing the initial position can significantly distort the trajectory.

Since the gyroscope of an MPU6000 sensor calculates the rate of change of orientation angles, there is a need to use data from other sources to calculate these angles at the time instant $t = 0$. Thus, when using MPU6000 sensors, **the problem of determining the initial values of the orientation angles** φ, θ, γ arises.

In this study, the initial value of the yaw angle ψ_0 is calculated on the basis of magnetometer data. The following approach is proposed to calculate the pitch and roll angles.

Introduce

$$\begin{cases} a_{x,0} = g \cdot \tilde{n}_{x,11}, \\ a_{y,0} = g \cdot \tilde{n}_{y,11}, \\ a_{z,0} = g \cdot \tilde{n}_{z,11}, \end{cases} \quad (1)$$

where $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. As mentioned above, the UAV is assumed to be stationary for the first 10÷15 seconds. Using the matrix \mathbf{A} introduced above, we can write the components of the gravitational acceleration that affect the UAV during this time for the coordinate system $Oxyz$ as follows:

$$A \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{x,0} \\ a_{y,0} \\ a_{z,0} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Then we get the following formulas to calculate the values of the orientation angles θ, γ corresponding to the instant $t = 0$:

$$\begin{cases} \theta_0 = \arcsin \frac{a_{x,0}}{g}, \\ \gamma_0 = -\arctg \frac{a_{z,0}}{a_{y,0}}. \end{cases} \quad (3)$$

V. CALCULATING THE ACCELERATION

Accumulation of angular velocity measurement errors by the MPU6000 sensor during long flights causes the calculated trajectory to deviate significantly from the actual flight path. Therefore, the **problem of periodic refinement of orientation angles** on the basis of other data during the flight arises.

The following approach is proposed in this study to solve this problem.

We assume that a UAV flying in a stable engine operation mode moves in a straight line at a constant speed, keeping its orientation in some parts of the trajectory unchanged. This period of time can last up to 5÷6 seconds. We denote the UAV orientation angles for this period of time by $\psi_0, \theta_0, \gamma_0$. Given that this is a relatively robust sensor, the angle ψ_0 can still be determined using the magnetometer.

Suppose that the time instants $t_i, t_{i+1}, \dots, t_{i+N-1}$, where $N \cong 55$, belong to the period of stable flight of the UAV. Using formulas (1), based on the load data coming from the sensors at the same time instants, we can calculate the accelerations $a_{x,i+j}, a_{y,i+j}, a_{z,i+j}$, $j = 0, 1, \dots, N-1$.

One of the main indications of rectilinear flight at a constant speed is the equality

$$a_{x,i+j}^2 + a_{y,i+j}^2 + a_{z,i+j}^2 = g^2 \quad (4)$$

being satisfied for all j . Given relations (2), the following equalities have to be satisfied in the ideal case as well:

$$\begin{cases} a_{x,i+j} = g \sin \theta_0, \\ a_{y,i+j} = g \cos \gamma_0 \cos \theta_0, \\ a_{z,i+j} = -g \sin \gamma_0 \cos \theta_0. \end{cases} \quad (5)$$

But due to sensor measurement errors, equalities (4) and (5) are not satisfied with sufficient accuracy.

We denote the accelerations determined by the right-hand side of equations (5) by $\tilde{a}_{x,0}, \tilde{a}_{y,0}, \tilde{a}_{z,0}$, respectively. Then the condition that these equations are satisfied on average with accuracy ε can be written as follows:

$$J(\tilde{a}_{x,0}, \tilde{a}_{y,0}, \tilde{a}_{z,0}) \equiv \sum_{j=0}^{N-1} \left[(a_{x,i+j} - \tilde{a}_{x,0})^2 + (a_{y,i+j} - \tilde{a}_{y,0})^2 + (a_{z,i+j} - \tilde{a}_{z,0})^2 \right] \leq \varepsilon^2, \quad (6)$$

where ε is a known number calculated within the measurement error of the MPU6000 sensor.

From the minimality condition of the function $J(\tilde{a}_{x,0}, \tilde{a}_{y,0}, \tilde{a}_{z,0})$ we can obtain the following possible values for the quantities $\tilde{a}_{x,0}, \tilde{a}_{y,0}, \tilde{a}_{z,0}$:

$$\begin{cases} \tilde{a}_{x,0} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} a_{x,i+j}, \\ \tilde{a}_{y,0} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} a_{y,i+j}, \\ \tilde{a}_{z,0} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} a_{z,i+j}. \end{cases} \quad (7)$$

Thus, the following algorithm can be used to solve the problem of periodic refinement of the orientation angles.

- Verify that the accelerations $a_{x,i+j}, a_{y,i+j}, a_{z,i+j}$, $(j = 0, 1, \dots, N-1)$ calculated from the loads measured at the time instants $t = t_{i+j}$ satisfy necessary conditions (4) for the current instant t_{i+N-1} with sufficient accuracy.
- If conditions (4) are satisfied, calculate the accelerations $\tilde{a}_{x,0}, \tilde{a}_{y,0}, \tilde{a}_{z,0}$ using formulas (7).
- Verify that inequality (6) is satisfied for the calculated accelerations.
- If (6) is satisfied, it is considered that the UAV is moving in a straight line at a constant speed, and its orientation angles θ_0, γ_0 are calculated from formulas (3).

VI. CONCLUSION

We demonstrate the possibility of using the data from inertial sensors to calculate the trajectory of unmanned aerial vehicles. Since sensor data are noisy, a filtering algorithm is applied. The orientation angles-related data of the MPU6050 sensor is the value of angular velocity. The initial position being known is an important condition for calculating the orientation angles. The paper describes the procedure for finding the angles at the initial position. Furthermore, an algorithm is presented for refining the values of the orientation angles using loads on the section of the trajectory where the UAV flies in a straight line at a constant speed. The procedure for using the refined data from the sensors in the calculation of the trajectory is given.

REFERENCES

- [1] T. Shmelova et al., "Cases on modern computer systems in aviation," Hershey: IGI Global, 2019.
- [2] E. N. Sabziev, "Algorithm of aircraft flight data processing in real-time," Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, vol. 108, 2020, pp. 213–221.
- [3] "MPU-6000 and MPU-6050. Product Specification. Revision 3.4. Document Number: PS-MPU-6000A-00," Sunnyvale: InvenSense Inc, 2013.
- [4] H. Jian, "Design of angle detection system based on MPU6050. In Proceedings of the 7th International Conference on Education, Management," Information and Computer Science (ICEMC 16–June 18, 2017), Shenyang, China, 2017, pp. 6–8.
- [5] B. Paul, "Davenport. Mathematical analysis for the orientation and control of the orbiting astronomical observatory satellite," Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1963.
- [6] V.V. Buldygin et al., "Linear algebra and analytic geometry: Education. Manual," Kyiv: NTUU "KPI", 2011 (in Ukrainian).

Comparative analysis of the efficiency of various energy storages

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.010>

Arif Hasanov

Military Scientific Research Institute
of the National Defense University
Baku, Azerbaijan
arif.h.hasanov@gmail.com

Elshan Hashimov

National Defense University,
Azerbaijan Technical University
Baku, Azerbaijan
hasimovel@gmail.com

Bakir Zulfugarov

Military Scientific Research Institute
of the National Defense University
Baku, Azerbaijan
bakirzulfugar@gmail.com

Abstract—The use of renewable energy creates the need to solve the problem of its discontinuity. Previous experience has shown that energy storage devices are best suited for this. They can be attributed to new technologies, since the operation of some energy storage devices is based on the latest achievements of modern science and technology. Energy storages is now at the beginning of its development, as renewable energy is still used to a limited extent. But which of the ubiquitous different types of energy storages is most likely to be the most efficient for the future industrial energy supply? The aim of the research was to obtain an answer to the above question. For this, seven types of energy storages, the use of which is spreading in the world, are analyzed in a comparative manner in terms of the most important parameters. The comparison was made using mathematical methods of data analysis, based on data collected from the relevant literature, and allows a fairly objective answer to the question under study.

Keywords—energy storage; gravitational energy storage; electrochemical energy storage; capacitor energy storage; thermal energy storage; flywheel energy storage; compressed air energy storage; cryogenic energy storage.

I. INTRODUCTION

Recently, the transition to renewable energy has been widely discussed around the world, but the difficulties that will follow this transition are often ignored. However, the possibility of using renewable energy will depend on the elimination of the aforementioned difficulties.

Renewable energy has a number of advantages over traditional energy, but it also has serious disadvantages. In most cases, it can only be provided intermittently. These breaks can be regular and predictable, as in the energy of the Sun, sea tides, or irregular and unpredictable, as in the energy of the wind, sea waves. The intermittency of renewable energy is one of its main disadvantages [1–4].

Even now, when traditional energy sources are universally preferred, power outages occur and this is a problem. But in the future, with the transition to the use

of renewable energy, interruptions in its supply will become common and frequent, and the problem will increase dramatically. This will have a serious negative impact on energy consumers.

The results of previous analyzes show that the use of energy storage means is the most optimal solution to the problem under consideration. At the same time, a certain amount of supplied energy with its excess (for example, at night or during hours of less consumption) can be accumulated and stored. When energy decreases (for example, during peak hours) or it is off, previously accumulated energy can be used. This means that renewable energy sources require the use of energy storages along with them [5–16].

Energy storages is currently being deployed mainly at the level of commercial and demonstration projects in some countries that are starting a gradual transition to renewable energy. They are of different types and differ sharply from each other in terms of the principle of operation, device, technical capabilities and financial costs. Along with all this, there is no doubt that the need for the use of energy storages will arise and increase as the transition to the widespread use of renewable energy around the world [5–16].

But a natural question arises: what type of energy storage among many different types will be the most effective for future uninterrupted power supply on an industrial scale? Getting a definitive answer to this question was the aim of the study. To do this, the most objective comparative analysis was carried out, the result of which was supposed to form an answer to the question posed.

In the research, based on the collected theoretical material, the effectiveness of seven types of energy storage devices that are gaining distribution in the world has been studied and analyzed in terms of technical and economic aspects. These are electrochemical, electrocapacitive, thermal, mechanical kinetic (flywheel), mechanical potential (gravitational), compressed air and cryogenic energy storages. To simplify the task a little, the influence of the terrain, atmospheric pressure,

temperature, humidity, wind and other natural phenomena on the operation of these energy storages is not taken into account.

Based on the results of previous analyzes, it is assume that a mechanical potential (gravitational) energy storage will be more effective than other storages. The research should confirm or refute this assumption.

II. METHODOLOGY

Such methods of scientific research as comparison, abstraction, axiomatic, analysis, synthesis, formalization and induction were used during the research.

Seven parameters were selected for the research, which are most important for the characteristics of energy storages and are most often found in the literature. These are output power, capacity, efficiency, response time, discharge time at rated power, service life and unit cost [5–24].

Considering inflation, unit cost data were used only for the last 6 years.

If the parameter value changes, the average value is taken for calculations:

$$\text{Average} = (\text{Least value} + \text{Largest value}) / 2 \quad (1)$$

Some values in the literature are expressed as the plural form of the unit of measurement (like seconds, minutes, etc.), without specifying a number. To get the numbers needed for evaluation, the plural form is converted to a numeric form. For this, the principle was applied: the plural form of the unit of measurement was taken as half of the unit of measurement one step more. For example, "seconds" were taken as half a minute – 30 seconds, "minutes" – half an hour (30 minutes), etc.

Each type of energy storage was evaluated by a final coefficient based on 3 general principles: 1) the final coefficient of a particular type of energy storage is formed by the sum of the coefficients corresponding to the values for each parameter; 2) no preference is given to any parameter, the significance of each parameter is taken equal for the final assessment; 3) a good parameter value gets a proportionally larger one, and a bad value gets a smaller coefficient.

To implement the above principles, it is required to determine the coefficients corresponding to the values for each parameter for each type of drive (total $7 \times 7 = 49$ coefficients). To do this, first, within each parameter, the sum of all 7 coefficients that correspond to seven different types of drives was taken equal to 100, and the sum of all 49 coefficients for all seven parameters was 700.

If it is better for a parameter to have a larger numerical value, then the coefficient (C) was calculated as follows:

$$C = TV \times 100 / \text{Sum TV}. \quad (2)$$

Here TV is the type value and Sum TV is the sum of values of all types. If it is better for a parameter to have a smaller numerical value, then inverse proportionality was applied and the coefficient was calculated in three steps.

At the first step, the intermediate coefficient (IC) was calculated:

$$IC = TV \times 100 / \text{Sum TV}. \quad (3)$$

At the second step, the reciprocal of the intermediate coefficient (RIC) was calculated:

$$RIC = 1 / IC. \quad (4)$$

At the third step, the coefficient was calculated:

$$C = RIC \times (100 / \text{Sum RIC}). \quad (5)$$

Here Sum RIC is the sum of RIC of all types. After that, the final coefficient (FC) was calculated by summing all the coefficients:

$$FC = C1 + \dots + C7. \quad (6)$$

III. RESEARCH RESULTS

More than a hundred different literatures were studied to collect data. Forty seven of them: [5-51] were particularly useful, and all data were taken from these sources. Various values of energy storage parameters available in the mentioned literature were taken and recorded in groups. As a result, 49 sets of values were formed, each of which corresponded to a certain parameter of a certain type of energy storage. Then, according to (1), the average for each set of values was calculated. Based on the obtained averages, Table 1 was compiled.

TABLE I. CALCULATED AVERAGES FOR PARAMETER VALUES OF ENERGY STORAGES

Parameter	Averages for Parameter Values of Energy Storages						
	<i>Electrochemical</i>	<i>Electro capacitive</i>	<i>Thermal</i>	<i>Flywheel</i>	<i>Gravitational</i>	<i>Compressed air</i>	<i>Cryogenic</i>
Output power	125 MW	150 kW	250 MW	10 MW	3.5 GW	1.5 GW	0.5 GW
Capacity	125 MWh	0.6 kWh	5.8 GWh	2.5 MWh	40 GWh	1.5 GWh	250 MWh
Efficiency, %	72	92	53	91	80	61	43
Response time	30 se-conds	0.5 se-conds	8 minu-tes	1.5 minu-tes	1 minu-te	1.5 minu-tes	1.5 minu-tes
Discharge time at rated power	42 hours	15 minu-tes	48 hours	6 hours	48 hours	48 hours	48 hours
Service life, years	12	15	30	15	35	35	30
Unit cost, \$/kWh	2020	5050	62	3900	216	71	335

Evaluation began after the full formation of Table 1. Since other formulas were used in the case where the lower numerical value is considered the best, the corresponding parameters were evaluated separately.

Since it is better to have large numerical values for output power, capacity, efficiency, discharge time at rated power and service life, the coefficients corresponding to them were calculated by (2). The 5 coefficients obtained from these calculations for each type of energy storage (total $7 \times 5 = 35$) were entered in Table 2.

Since it is better to have smaller numerical values for response time and unit cost, the coefficients corresponding to them were calculated in three steps using (3), (4) and (5).

At the first step, intermediate coefficients corresponding to the values of the parameters were calculated using (3).

At the second step, the reciprocals of the intermediate coefficients were calculated using (4).

At the third step, calculations were made using (5) and the obtained 2 more coefficients for each type of energy storage (14 in total) were entered in Table 2.

Finally, according to (6), the final coefficients were calculated based on the terms in each column.

TABLE II. COEFFICIENTS BY PARAMETERS AND FINALS FOR EVALUATING ENERGY STORAGES

Parameter	Coefficients Obtained as a Result of Evaluating Parameter Values						
	<i>Electrochemical</i>	<i>Electro capacitive</i>	<i>Thermal</i>	<i>Flywheel</i>	<i>Gravitational</i>	<i>Compressed air</i>	<i>Cryogenic</i>
Output power	2.12	0.0025	4.25	0.17	59.47	25.49	8.50
Capacity	0.26	1.3e-6	12.17	0.0052	83.90	3.15	0.52
Efficiency	14.63	18.70	10.77	18.50	16.26	12.40	8.74
Response time	1.58	95.94	0.10	0.53	0.79	0.53	0.53
Discharge time at rated power	17.48	0.10	19.98	2.50	19.98	19.98	19.98
Service life	6.98	8.72	17.44	8.72	20.35	20.35	17.44
Unit cost	1.28	0.51	41.71	0.66	11.92	36.20	7.72
Final coefficients	44.33	123.97	106.42	31.09	212.67	118.10	63.43

IV. CONCLUSION

Thus, the results of the research confirmed the proposed hypothesis. The gravitational energy storage showed the best result with a final coefficient of 212.67. This is 2.13 times better than the arithmetic mean of 100 for all types of energy storages analyzed.

When planning the use of energy storages on an industrial scale in a variety of areas, it will be advisable to give preference to gravitational devices.

REFERENCES

- [1] M. Roser, *Why did renewables become so cheap so fast?* [Online]. URL: <https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>. (Accessed: October 15, 2023).
- [2] "What is renewable energy?" [Online]. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy>. (Accessed: October 15, 2023).
- [3] Advantages and Disadvantages of Renewable Energy. [Online]. URL: <https://www.conserve-energy-future.com/advantages-and-disadvantages-of-renewable-energy.php>. (Accessed: October 15, 2023).
- [4] H.K. Lakeh, "What Are the Advantages and Disadvantages of Renewable Energy?" [Online]. URL: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2021/09/advantages-and-disadvantages-of-renewable-energy>. (Accessed: October 15, 2023).
- [5] "Electricity and Energy Storage." [Online]. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/electricity-and-energy-storage.aspx#:~:text=Storage%20systems%20for%20electricity%20include,of%20energy%20they%20can%20store>. (Accessed: October 15, 2023).
- [6] L. Yao, B. Yang, H. Cui, J. Zhuang, J. Ye, and J. Xue, Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*.2016. Vol. 4. Pp. 519–528.
- [7] J.I. San Martín, I. Zamora, J.J. San Martín, V. Aperribay, P. Eguía, *Energy Storage Technologies for Electric Applications*. [Online]. URL: <http://www.sc.edu/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento/almacenamiento.html>. (Accessed: October 15, 2023).
- [8] "Electric Energy Storage," [Online]. URL: <https://www.c2es.org/content/electric-energy-storage/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [9] S. Perkins, *Explainer: How batteries and capacitors differ*. [Online]. URL: <https://www.snexplores.org/article/explainer-batteries-capacitors>. (Accessed: October 15, 2023).
- [10] "Energy storage for electricity generation." [Online]. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/energy-storage-for-electricity-generation.php>. (Accessed: October 15, 2023).
- [11] Energy Storage: How It Works and Its Role in an Equitable Clean Energy Future. [Online]. URL: <https://www.ucsusa.org/resources/how-energy-storage-works>. (Accessed: October 15, 2023).
- [12] "Electricity Storage." [Online]. URL: <https://www.epa.gov/energy/electricity-storage>. (Accessed: October 15, 2023).
- [13] J. S. Jones, *The different types of energy storage and their opportunities*. [Online]. URL: <https://www.smart-energy.com/storage/the-different-types-of-energy-storage-and-their-opportunities/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [14] R. J. Campbell. *Electricity Storage: Applications, Issues, and Technologies*. [Online]. URL: <https://www.everycrsreport.com/reports/R45980.html>. (Accessed: October 15, 2023).
- [15] Energy Storage: How It Works at Home and on the Grid. [Online]. URL: <https://justenergy.com/blog/energy-storage-how-it-works-home-and-grid/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [16] Packing some power. [Online]. URL: <https://www.economist.com/technology-quarterly/2012/03/03/packing-some-power?frsc=dg%7Ca>. (Accessed: October 15, 2023).
- [17] Pumped Hydroelectric Energy Storage. [Online]. URL: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/PHS-page>. (Accessed: October 15, 2023).
- [18] Compressed Air Energy Storage. [Online]. URL: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/CAES-page>. (Accessed: October 15, 2023).

- [19] “Batteries.” [Online]. URL: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/Batt-page>. (Accessed: October 15, 2023).
- [20] “Flywheels.” [Online]. URL: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/Flywheels-page>. (Accessed: October 15, 2023).
- [21] “Supercapacitors.” [Online]. URL: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/Supercaps-page>. (Accessed: October 15, 2023).
- [22] “Cryogenic Energy Storage.” [Online]. URL: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/Cryo-page>. (Accessed: October 15, 2023).
- [23] Thermal Energy Storage. [Online]. Available: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/TES-page>. (Accessed: October 15, 2023).
- [24] B. G. Ibrahimov, E.G. Hashimov, A.M. Talibov, and A.H. Hasanov. Research and analysis indicators fiber-optic communication lines using spectral technologies. *Advanced information systems*. 2022. Vol. 6(1). Pp. 61–64. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.10>
- [25] A. C. Ruoso, N. R. Caetano, and L.A.O. Rocha. Storage Gravitational Energy for Small Scale Industrial and Residential Applications. *Inventions*. 2019. Vol. 4(4). Pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/inventions4040064>
- [26] J.A. Jeevarajan, T. Joshi, M. Parhizi, T. Rauhala, and D. Juarez-Robles. Battery Hazards for Large Energy Storage Systems. *ACS Energy Lett*. 2022. Vol. 7. Pp. 2725–2733.
- [27] “Engineer-Poet: The Ergosphere: Zinc: Miracle metal?” [Online]. URL: <http://ergosphere.blogspot.com/2005/06/zinc-miracle-metal.html>. (Accessed: October 15, 2023).
- [28] V. Talawar, *Different Types Of Energy Storage Devices To Store Electricity*. [Online]. URL: <https://cselectricalandelectronics.com/different-types-of-energy-storage-devices-to-store-electricity/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [29] D.V. Crotzer. *Energy Storage Myths: #1 Arbitrage*. [Online]. URL: <https://www.energystorageconsultants.com/energy-storage-arbitrage/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [30] P. Hutchins. *U.S. Utility-Scale Battery Storage Power Capacity to Grow Substantially by 2023*. [Online]. URL: <https://www.ajot.com/news/us-utility-scale-battery-storage-power-capacity-to-grow-substantially-by-2023>. (Accessed: October 15, 2023).
- [31] Compressed Air Energy Storage. URL: <https://caes.pnnl.gov/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [32] M. Dooner. *Thermal energy storage*. [Online]. URL: <https://estoolbox.org/index.php/en/background-2/8-samples/8-tes-introduction>. (Accessed: October 15, 2023).
- [33] Energy Storage Association Homepage. [Online]. URL: <http://energystorageassociationarchive.org/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [34] C. Dalvi, *Cryogenic Energy Storage*. [Online]. URL: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/dalvi2/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [35] “Building the future of renewables using gravitational energy storage.” [Online]. URL: <https://greengravity.com/technology/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [36] S.K. Moore. Gravity energy storage will show its potential in 2021. [Online]. URL: <https://spectrum.ieee.org/gravity-energy-storage-will-show-its-potential-in-2021>. (Accessed: October 15, 2023).
- [37] A. Lane. Can gravity batteries solve our energy storage problems? [Online]. URL: <https://www.bbc.com/future/article/20220511-can-gravity-batteries-solve-our-energy-storage-problems>. (Accessed: October 15, 2023).
- [38] D. Z. Morris. Energy-Storing Train Gets Nevada Approval. [Online]. URL: <https://fortune.com/2016/05/22/energy-storing-train-nevada/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [39] A. Rathi. Stacking concrete blocks is a surprisingly efficient way to store energy. [Online]. URL: <https://qz.com/1355672/stacking-concrete-blocks-is-a-surprisingly-efficient-way-to-store-energy>. (Accessed: October 15, 2023).
- [40] U. Eberle, R. von Helmolt. Sustainable transportation based on electric vehicle concepts: A brief overview. *Energy Environ. Sci*. 2010. Vol. 3. Pp. 689–699.
- [41] B. G. Ibrahimov, E. G. Hashimov. Analysis and Selection Performance Indicators Multiservice Communication Networks Based on the Concept NGN and FN. *Computer and information systems and technologies* : Fifth International Scientific and Technical Conference (CIST, April, 2021). Kharkiv : Computer and information systems and technologies, 2021. Pp. 96–98. DOI: <https://doi.org/10.30837/csitic52021232904>
- [42] D. Roberts, *Using electricity at different times of day could save us billions of dollars*. [Online]. URL: <https://www.vox.com/energy-and-environment/2019/8/7/20754430/renewable-energy-clean-electricity-grid-load-flexibility>. (Accessed: October 15, 2023).
- [43] D. Timmons, *Opinion: We now have the technology to create a grid of cheap fully renewable electricity*. [Online]. URL: <https://www.marketwatch.com/story/we-now-have-the-technology-to-create-a-grid-of-cheap-fully-renewable-electricity-2019-08-22>. (Accessed: October 15, 2023).
- [44] P. Maloney, *Minnesota study finds it cheaper to curtail solar than to add storage*. [Online]. URL: <https://www.utilitydive.com/news/minnesota-study-finds-it-cheaper-to-curtail-solar-than-to-add-storage/546467/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [45] J. Eyer. Electric utility transmission and distribution upgrade deferral benefits from modular electricity storage. Albuquerque : Sandia National Laboratories, 2009.
- [46] Pumped Storage. [Online]. URL: <https://www.hydro.org/waterpower/pumped-storage/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [47] R. Walton \$1B Montana pumped storage hydro project secures funding. [Online]. URL: <https://www.utilitydive.com/news/1b-montana-pumped-hydro-project-secures-funding/558833/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [48] A. Lee. Global renewables group tests concrete flywheel energy storage. [Online]. URL: <https://www.rechargenews.com/transition/global-renewables-group-tests-concrete-flywheel-energy-storage/2-1-605228>. (Accessed: October 15, 2023).
- [49] R. Gupta, N. K. Sharma, P. Tiwari, A. Gupta, N. Nigam and A. Gupta. Application of energy storage devices in power systems. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2011. Vol. 3(1). Pp. 289–297.
- [50] N. Kularatna, and K. Gunawardane. Capacitors as energy storage devices: Simple basics to current commercial families. *Energy Storage Devices for Renewable Energy-Based Systems (Second Edition), Rechargeable Batteries and Supercapacitors*. 2021. Pp. 181–197.
- [51] Wayback Machine. [Online]. URL: https://web.archive.org/web/20140801113053/http://www.colorado.edu/engineering/energystorage/files/MSThesis_JGLevine_final.pdf. (Accessed: October 15, 2023).

V-Model for Air Defense Systems

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.011>

Hashimov E.G.

National Defense University,
Azerbaijan Technical University
Baku, Azerbaijan
hasimovel@gmail.com

Khudeynatov E. K.

Military Scientific Research Institute,
Baku, Azerbaijan
elnurkamal@gmail.com

Abstract—This article explores the application of the V model, a structured software development and testing framework, to air defense systems. The V model's sequential approach aligns development and testing phases, promoting comprehensive verification and validation. The article delineates the adaptation of the V model to air defense systems, encompassing both verification and validation activities. Verification ensures adherence to design and requirements, while validation assesses system alignment with user needs. The article underscores the benefits of early issue identification, higher-quality software, and improved system performance through the V model's systematic approach.

Keywords—V model, software development, software testing, air defense systems, verification, validation, structured approach, sequential design, requirements analysis, system design, integration testing, system testing, acceptance testing, quality assurance, system performance, and defense capabilities.

I. INTRODUCTION

Renowned as a widely accepted paradigm, the V Model stands tall as a framework for software development and testing, celebrated for its meticulously structured and systematic approach. Its primary objective revolves around ensuring the caliber and precision of the systems under construction. This article embarks on a journey to unravel the application of the V Model within the intricate realm of air defense systems, magnifying its pertinence in both verification and validation pursuits.

At the heart of the V Model lies a profound philosophy: each step in the development voyage is intrinsically linked to its corresponding testing phase. This harmonious relationship forms the cornerstone of its efficacy. By embracing the V Model, organizations forge an agile path to unearth and address concerns at an early juncture in the developmental trajectory. The dividends are remarkable—a software fabric interwoven with quality and an amplified prowess of system performance.

In this exploration, the V Model's capabilities are illuminated through its seamless integration with air defense systems. The fusion of this methodology with the intricacies of safeguarding airspace lends itself to an impeccable synergy, where verification and validation activities blend in orchestration. The V Model emerges as a guiding beacon, instilling discipline into the development process while bolstering the integrity of the ensuing software.

Embracing the V Model isn't just a choice; it's a strategic move that redefines the software landscape. As

organizations align themselves with this paradigm, they harness the power to sculpt a future characterized by enhanced quality, optimized performance, and a proactive stance in addressing potential pitfalls. The V Model isn't just a methodology; it's a transformative force propelling software development and testing to new heights.

II. V MODEL

V-Model also referred to as the Verification and Validation Model. In this, each phase of the software development life cycle must complete before the next phase starts. It follows a sequential design process same as the waterfall model. Testing of the device is planned in parallel with a corresponding stage of development [1]. The V model, named after its visual representation resembling the letter "V", emphasizes a structured approach to software development and testing. It ensures that each development phase has a corresponding testing phase, enabling a comprehensive verification and validation process.

The V model typically consists of the following phases [2]:

- requirements gathering and analysis: This initial phase establishes the project's foundation, meticulously capturing and comprehending user needs and expectations;
- system design: Building upon the requirements, this phase crafts a high-level blueprint of the system's architecture, ensuring alignment with user expectations.
- subsystem design: Diving into the specifics, this phase details the design of individual subsystems and components, fostering modularity and reusability.
- coding and unit testing: Translating designs into reality, this phase involves the creation of software and hardware components, coupled with thorough unit testing to ensure their correctness.
- integration and testing: Components harmoniously converge during this phase, and their interactions undergo comprehensive testing, verifying their cohesive functionality.
- system testing: A holistic assessment of the fully integrated system transpires, evaluating its performance against predefined requirements and specifications.

- acceptance testing: In this conclusive phase, the system is subjected to meticulous testing against user requirements, ensuring it fulfills its intended purpose to the utmost satisfaction.

An important aspect of this model is that testing activities like planning, test designing happens well before coding. The advantage is that it saves ample amount of time and since the testing team is involved early on, they develop a very good understanding of the project at the very beginning. The V-Model demonstrates the relationships between each phase of the development life cycle and its associated phase of testing [3].

III. ENHANCING AIR DEFENSE SYSTEMS THROUGH THE APPLICATION OF THE V MODEL OF SYSTEMS ENGINEERING

Air defense systems play a pivotal role in safeguarding airspace and critical assets from an array of aerial threats including aircraft, missiles, drones, and other airborne platforms. Despite their significant evolution, these systems encounter persistent difficulties, limitations, and challenges. The V model emphasizes the paramount significance of validation and verification throughout the developmental life-cycle. Several key challenges are scrutinized, including the complex and evolving threat landscape, integration and interoperability concerns, false positives and negatives, budget constraints, rapid technological advancements, and cybersecurity vulnerabilities. For each challenge, corresponding recommendations are proposed to harness the capabilities of the V model, thereby augmenting the resilience, adaptability, and efficacy of air defense systems in the face of dynamic and evolving threats. Here are a few difficulties and recommendations:

1. Complex and Evolving Threat Landscape:

Challenge: Aerial threats are becoming more diverse, including stealthy aircraft, hypersonic missiles, and swarming drones. Adversaries continuously adapt their tactics and technology to bypass defenses.

Recommendation: The V model can help by emphasizing a robust system design phase that considers a wide range of potential threats and scenarios. Frequent testing and validation against emerging threats are crucial to ensure the system remains effective.

2. Integration and Interoperability:

Challenge: Air defense systems often consist of multiple subsystems and components from different manufacturers. Ensuring seamless integration and interoperability can be complex.

Recommendation: The V model encourages a structured approach to integration testing, ensuring that each component and subsystem is thoroughly tested in isolation and as part of the larger system. This reduces the risk of compatibility issues during critical operations.

3. False Positives and Negatives:

Challenge: Air defense systems can generate false alarms (positives) or miss genuine threats (negatives), leading to inefficient use of resources or potential vulnerabilities.

Recommendation: Applying the V model's verification and validation phases rigorously can help identify and rectify potential sources of false alarms or missed threats. Extensive testing and simulations can fine-tune algorithms to reduce such occurrences.

4. Limited Resources and Budget Constraints:

Challenge: Developing, procuring, and maintaining air defense systems can be expensive. Limited resources and budget constraints can impact system capabilities and upgrades.

Recommendation: The V model's focus on early requirement definition and continuous validation ensures that the system meets its intended objectives. Prioritizing essential capabilities and regularly assessing the system's effectiveness can optimize resource allocation.

5. Rapid Technological Advancements:

Challenge: The pace of technological innovation can quickly render air defense systems obsolete or less effective.

Recommendation: The V model's iterative development approach can help air defense systems adapt to new technologies more efficiently. Regularly reviewing and updating system requirements and incorporating the latest advancements can extend the system's operational life.

6. Cybersecurity vulnerabilities:

Challenge: Air defense systems are increasingly reliant on digital technologies, making them susceptible to cyberattacks.

Recommendation: The V model emphasizes thorough testing and validation of software components. Incorporating robust cybersecurity measures and conducting regular penetration testing can help identify and address vulnerabilities.

In summary, the V model of systems engineering can be a valuable framework for addressing the difficulties and shortcomings of air defense systems. By emphasizing thorough testing, validation, and iterative development, the V model can enhance the effectiveness, adaptability, and reliability of these critical systems in the face of evolving threats and challenges.

IV. V MODEL FOR AN AIR DEFENSE SYSTEMS

It is possible to use the V-model (also known as the V&V) as the basis for the life-cycle management activities to be used in the development of an AD system "Fig. 1". The V model for an air defense system would follow a similar structure as the generic V model but with specific phases and activities tailored to the development and testing of an air defense system. In the V model for an air defense system, both verification and validation activities are involved. Verification and validation are distinct activities that aim to ensure the quality and correctness of a system, but they focus on different aspects.

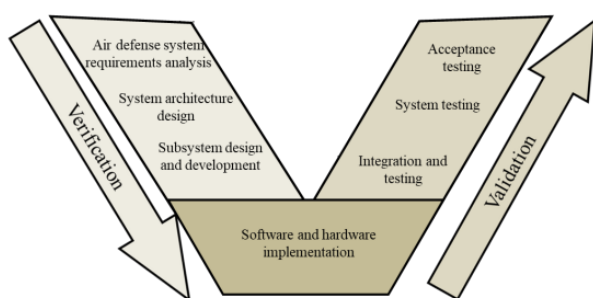


Figure 1. V-model for an Air defense system

Verification is a process of evaluating the software product in its development phase to find out whether it meets the specified requirements [4]. These activities confirm that the system is being built correctly according to the defined design and requirements. In the context of the V model for an air defense system, the following activities are verification activities:

1. Air defense system requirements analysis: Gather and analyze the specific requirements for the air defense system, considering factors such as target detection, tracking, interception capabilities, communication protocols, and system performance criteria.
2. System architecture design: Develop the high-level architecture design for the air defense system, including the integration of various subsystems such as radar systems, command and control centers, missile launchers, communication systems, and data processing units.
3. Subsystem design and development:
 - a. Radar system design and development: Design and develop the radar subsystems responsible for detecting and tracking airborne targets.
 - b. Command and control system design and development: Design and develop the command and control subsystems responsible for managing the air defense system, coordinating radar data, and issuing interception commands.
 - c. Missile launcher system design and development: Design and develop the missile launcher subsystems responsible for launching and guiding missiles to intercept targets.
4. Software and hardware implementation: Implement the software and hardware components for each subsystem, including radar signal processing algorithms, command and control software, communication interfaces, and missile guidance systems.

Validation, on the other hand, confirms that your product meets its user needs [5]. These activities assess whether the system meets the needs of the end-users and stakeholders. In the V model for an air defense system, the following activities are validation activities:

1. Integration and testing:
 - a. Subsystem integration: Integrate the radar, command and control, and missile launcher subsystems into a unified air defense system.

- b. Integration testing: Conduct integration testing to verify the interoperability and proper functioning of the integrated subsystems, including data exchange, command propagation, and target tracking across different components.
2. System testing:
 - a. Functional testing: Test the air defense system against the defined functional requirements, including target detection and tracking, interception accuracy, response time, and system reliability.
 - b. Performance testing: Evaluate the performance of the system under various simulated scenarios, assessing factors such as response time, target engagement success rate, and system capacity.
 - c. Interoperability testing: Verify the compatibility and seamless operation of the air defense system with external systems, such as higher-level command centers and communication networks.
3. Acceptance testing: Conduct acceptance testing of the air defense system by relevant stakeholders, including the military, defense agencies, and end-users, to ensure that it meets their operational requirements and safety standards.

Verification activities ensure that the system is built correctly, while validation activities ensure that the correct system is built. By performing both verification and validation activities, the V model helps to mitigate risks, identify defects early, and ensure that the final air defense system meets the required standards and performs as intended.

It's important to note that the V model can be adapted and customized based on the specific needs and complexities of the air defense system being developed. The above outline provides a general framework for the development and testing phases involved in an air defense system, but the actual implementation may vary depending on the system's specifications and the organization's development processes.

V. CONCLUSION

In the realm of safeguarding airspace and critical assets, air defense systems serve as the frontline defense against a multitude of airborne threats. However, these systems, despite their evolution, are not immune to persistent difficulties, limitations, and challenges. Addressing these concerns requires a holistic and systematic approach, and the V model of systems engineering emerges as a guiding framework of paramount significance.

The V model's application within air defense systems underscores its capacity to fortify resilience, adaptability, and efficacy. The challenges faced by these systems, including the ever-evolving threat landscape, intricate integration hurdles, and cybersecurity vulnerabilities, demand a rigorous validation and verification approach. Each challenge is meticulously scrutinized, and recommendations grounded in the principles of the V model are proposed to mitigate their impact. The model's value is evident in its capacity to address complexities and uncertainties by emphasizing

comprehensive testing, iterative development, and continuous validation.

In parallel, the exploration of the V model's utilization as the foundation for life-cycle management activities in air defense system development highlights its adaptability and versatility. The tailored approach, encompassing verification and validation activities, resonates with the intricate nature of these systems. This tailored V model approach aligns development phases with corresponding testing stages, ensuring that the resultant system meets quality benchmarks while fulfilling its intended purpose.

As we conclude this discourse, the integration of the V model into the realm of air defense systems emerges as a transformative force. By embracing its principles, defense organizations can navigate the evolving landscape of threats, enhance interoperability, and secure critical assets with confidence. Ultimately, the V model's structured approach empowers air defense systems to rise above challenges and limitations,

solidifying their role as stalwart guardians of our airspace and security.

REFERENCES

- [1] V-Model [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://www.javatpoint.com/software-engineering-v-model>.
- [2] Dharmendra K. SDLC V-Model [Электронный ресурс] / Kumar Dharmendra. Software Engineering. 2013. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/softwareengineering-sdlc-v-model/>.
- [3] G. B. Regulwar, P. M. Jawandhiya, V. S. Gulhane, R. M. Tugnayat, and P. R. Deshmukh. Variations in V Model for Software Development. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2010. Vol. 1(2). Pp. 133–138.
- [4] A. Arora. Software Verification & Validation [Электронный ресурс]. Software testing. 2013. URL: <https://www.c-sharpcorner.com/article/software-testing-software-verification-validation>.
- [5] Design Verification anValidation Versus Human Factors Validation [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://www.emergobyul.com/news/design-verification-and-validation-versus-human-factors-validation>.

Evaluation of the dead zone of radar stations

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.012>

Hashimov E.G.

National Defense University,
Azerbaijan Technical University
Baku, Azerbaijan
hasimovel@gmail.com

Maharramov R.R.

Military Scientific Research Institute,
Baku, Azerbaijan
romanmeherremov.84@gmail.com

Sabziyev E.N.

Military Scientific Research Institute,
Institute of Control Systems
Baku, Azerbaijan
elkhan.sabziyev@gmail.com

Pashaev A.B.

Military Scientific Research Institute,
Institute of Control Systems
Baku, Azerbaijan
adalat.pashaev@gmail.com

Abstract—With the emergence of unmanned aerial vehicles, the assignments of combating them have also become significantly more relevant. Today, operational countermeasures against UAVs are of great importance. Modern UAVs are capable not only of conducting video reconnaissance in a certain area, but also of observing a specific object for a long time and striking it. After detecting and identifying UAVs by RLS, it is necessary to take measures to neutralize them. In the paper, a mathematical model of the evaluation of the dead zone of RLS working together for the effective detection of unmanned aerial vehicles was established and a comparison of the dead zone was made on concrete examples. The purpose of the research work is to solve the problem of effective placement of joint working RLS by mathematical methods for nonobserved remaining part of them had minimal volume and to select the necessary placement scheme.

Keywords—unmanned aerial vehicles; dead zone; radiolocation area; effective reflection area; radiolocation station.

I. INTRODUCTION

Analysis of the 2020 Patriotic War and the ongoing Russian-Ukrainian war, as well as recent occurring local wars and conflicts, shows that the detection of UAVs is one of the main issues for combating them [1–4]. For a more effective fight against UAVs, it is important factor to quickly detect them both at long distances and in the dead zone [5–7].

Modern local conflicts, where high-precision weapons and military equipment are more involved, impose new requirements for conducting combat operations. UAVs, in turn, at the present stage of the development of science and technology are being developed more and more, creating many difficulties for air defense systems. These difficulties are related to the following factors:

- small effective reflection area, i.e. small radiolocation visibility (effective reflection area 0,01-0,001 m²), visual detection less than 100 m (in ideal weather conditions), the hearing of the sound is 15-50 m, (0,5 Wt/rad);

- low flight speeds (10 - 30 m/sec), wide diapason of movement speeds, performance of flights at low and minimum altitudes using the terrain;
- to have the little time for obtaining information about the type of object according to its spatial (geometric) characteristics and making a timely decision;
- In the characteristics of the RLS, there are so-called "dead zone" with a radius of tens of kilometers, where it is impossible to detect and track aerial objects [8–10].

A dead zone (DZ) is a section of space above a RLS that is outside the radar's observations and in which the RLS cannot detect air targets (Fig.1). The presence of a dead zone is determined by the appropriate selection of the orientation diagram in the vertical plane of the radar station, which depends on the relief of the area in the area of influence of the station, the nature of the position, the height of the antenna and the technical parameters of the RLS. It is impossible to detect and track aerial targets in a dead zone [11].

The area of view of radiolocation stations is determined by the design of the RLS antenna and its operating characteristics (wavelength, transmission power, and other parameters).

When creating a grouping of RLS for the detection of UAVs, the detection zones of radiolocation stations have the following important features that must be taken into account:

1. The boundary of the sighting zones of the radiolocation stations indicates the diapason of target detection depending on the target's flight height. The earth's surface significantly affects the formation of the direction diagram of radiolocation stations for meter and decimeter ranges. This means that the terrain will have a significant effect on the area of view of the radiolocation station. As a result, the detection ranges of the same type of air targets at the same altitude can be different in different directions.

2. Radiolocation stations are used to conduct reconnaissance of the air enemy in a circular search mode. The detection of air attack vehicles by RLS in the vertical plane is limited, which leads to the presence of so-called "dead zone" in the field of vision, where it is impossible for RLS to observe air targets.

The following requirements must be met when creating a grouping of RLSs for the detection of UAVs:

- in the most probable flight directions of the enemy's air attacks (in front of the front line) the far border of the detection zone should be set;
- the continuous radiolocation area must cover the entire area at the possible altitudes of the enemy's air attack vehicles flight, and the probability of detecting targets at any point of the radiolocation area must be at least 0.75;
- radiolocation field should have high durability;
- the radiolocation area should be created with the maximum saving on the number of RLSs [12].

Currently, the state and trends of the development of UAV require the creation of a radar site at a height of several tens of meters (50-60 m). In this regard, a large number of RLS will be required to create a radiolocation area with this height of low boundary. Calculations show that when the height of the lower boundary of the radiolocation area is reduced from 500 m to 300 m, the need for the number of RLSs increases by 2.2 times, and when it is reduced from 500 m to 100 m, it increases by 7 times.

As a rule, the height of the upper border of the radiolocation area is not determined, they are determined by the capabilities of the radiolocation stations [13].

II. PROBLEM STATEMENT

The development of a general methodology for calculating the values of the intervals and distances between RLSs, which contain different types of radiolocation stations in the radiotechnical grouping, and the nature of the terrain does not significantly affect the radar area, constitutes the issue.

Thus, depending on the location of radiolocation stations in the area, the dead zone (zone outside of observation) will be different. The purpose of the research is to investigate the issue of evaluating the dead zone (zone outside of observation) depending on the place of radiolocation stations in the area.

III. MATHEMATICAL FORMULATION AND SOLUTION OF THE PROBLEM

We will assume that radiolocation stations operate in a fairly limited area, so we can ignore the curvature of the Earth's surface when describing the location area. To give the place of the radar stations relative to each other in the area, let us introduce the $Oxyz$ positively oriented rectangular coordinate system with related to the ground [14, p.73], traditionally, the Oz axis can be considered perpendicular to the Earth's surface, pointing vertically upwards.

Let's assume that it is planned to place k number of radiolocation stations in the area. Let us denote the coordinates of the locations of the radiolocation stations relative to the $Oxyz$ system through $\{(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, k\}$. According to the requirement of the problem, the distance between radiolocation stations is required to be at minimal l_0 , in other words, the following inequalities must be satisfied relative the coordinates of the points:

$$(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2 \geq l_0^2, \quad i, j = 1, 2, \dots, k, \quad i \neq j. \quad (1)$$

As mentioned above, in general, the characteristic indicators of radiolocation stations may differ from each other. Let us denote the target sighting distance of the i -th radiolocation station as d_i , and the characteristic angle of its unobserved sector as α_i ($i = 1, 2, \dots, k$).

In general, a dead zone (zone beyond observation) is a three-dimensional space figure, we will consider that the evaluation of these figures can be done based on their volume.

It is clear that geometrically the dead zone (zone outside of observation) of the i -th radiolocation station taken separately can be described as a truncated cone, let us denote this cone as K_i . Then the height of the cone K_i is calculated by the formula $h_i = d_i \operatorname{ctg} \frac{\alpha_i}{2}$. If take into account that the coordinates of the radar station are (x_i, y_i, z_i) , the cuted cone K_i can be expressed as

$$K_i = \left\{ (x, y, z) \mid x^2 + y^2 \leq \left[\frac{d_i}{h_i} (z - z_i) \right]^2, 0 \leq z - z_i \leq h_i \right\},$$

its volume will calculated by the following formula [15, p.347]:

$$V_{oi} = \iiint_{(x,y,z) \in K_i} dx dy dz = \pi \frac{d_i^2}{h_i^2} \int_{z_i}^{z_i+h_i} (z - z_i)^2 dz. \quad (2)$$

However, it is clear that to estimate the dead zone (zone excluded from observation) of radiolocation stations operating together the formal sum of the quantities determined by the formulas (2) cannot be taken, this is due to the fact that they have intersecting parts.

To solve the problem, it is necessary to reduce the volume of each radar station's dead zone (zone outside of observation) by the volume of the part that other radar stations can see this zone.

Let's calculate this volume for the i -th radiolocation station. For other radiolocation stations, the dead zone (zone outside of observation) is expressed as $\cup_{j \neq i} K_j$. Then it can be written the following formula for the sought volume:

$$V_i = \iiint_{(x,y,z) \in K_i \setminus \bigcup_{j \neq i} K_j} dx dy dz. \quad (3)$$

Considering that the sets $K_i \setminus \bigcup_{j \neq i} K_j$, $i = 1, 2, \dots, k$ do not intersect, we can write the following formula for the evaluation of the dead zone (zone outside of observation) for all radiolocation stations:

$$V = \sum_{i=1}^k V_i. \quad (4)$$

From a mathematical point of view, the problem of the minimum dead zone (zone outside of observation) of radiolocation stations operating together can be formed as follows:

- It is required to find such coordinates (x_i, y_i, z_i) for which the conditions (1) are satisfied and in this case the functional (4) takes a minimum value.

Note that the functional (4) is defined in the non-convex set $K_i \setminus \bigcup_{j \neq i} K_j$ and it is very difficult to give a general solution to such minimization problem. Therefore, the value of this type of functional is calculated by numerical methods.

On the other hand, the location of radiolocation stations cannot be arbitrary according to the existing infrastructure. Taking into account what has been said, it is suggested to find a rational solution to the problem. Thus, the best of the possible options proposed for the location of the stations can be considered as rational solution. In order to find a rational solution, a discrete version of the model (1) – (4) is written and functionals (4) are calculated for the proposed location options and compared with each other.

IV. EXAMPLES ON LOCATION OPTION EVALUATION

Example 1: Suppose that four RLSs of the same type are placed at the vertices of the square geometrically (Fig.1). Considering that the minimum distance (side of the square) between the radar stations is $l_0 = 15 \text{ km}$, the dead gap angle of each RLS is $\alpha = 130^\circ$ and the detection distance of RLS is $D_{max} = [km]$, we can find the volume V_0 of the dead zone of each RLS considered separately and the volume V of the dead zone which is caused by the joint location of these stations.

According to the data of the problem $h = 30 \text{ ctg} \frac{130^\circ}{2} \approx 13 \text{ [km]}$ and if we apply the formula (2), we obtain

$$V_0 = \pi \left(\frac{30}{14} \right)^2 \int_0^{14} z^2 dz \approx 12252 \text{ [km}^3\text{,]}$$

$$V_i \approx 6945 \text{ [km}^3\text{,]}, i = 1, 2, 3, 4$$

Then

$$V = \sum_{i=1}^4 V_i \approx 27781 \text{ [km}^3\text{].}$$

Thus, when comparing, it can be seen that V is about 1.6 times less than $4V_0$.

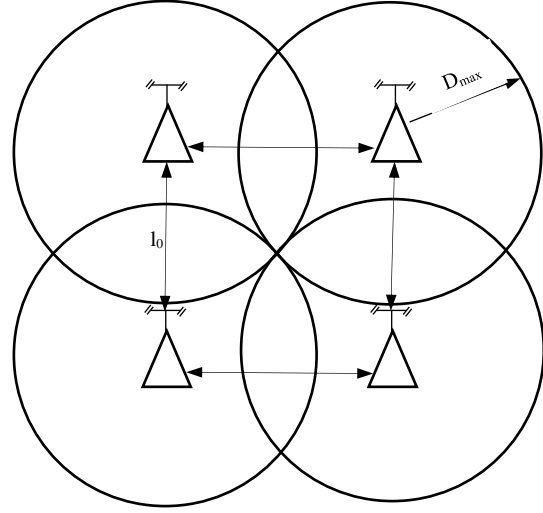


Figure 1. Schematic representation of the placement of RLSs at the vertices of a square geometrically

Example 2: Suppose that 3 radiolocation stations of the same type are placed at the vertices of an equilateral triangle (Fig.2).

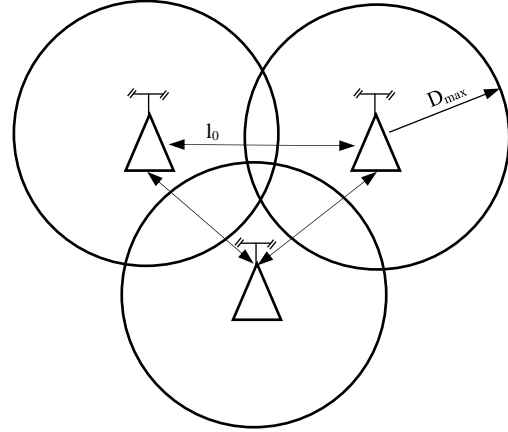


Figure 2. Schematic representation of the placement of RLSs at the vertices of a triangle geometrically

Taking into account that the minimum distance between radiolocation stations (side of the triangle) is $l_0 = 10 \text{ [km]}$, the angle of the dead zone of each RLS is $\alpha = 120^\circ$, the detection distance of the RLS is $D_{max} = 35 \text{ [km]}$, it is possible to evaluate the separate dead zone of each RLS V_0 and the total sector V .

Based on the data, $h = 35 \text{ ctg} \frac{120^\circ}{2} \approx 20 \text{ [km]}$. Then

$$V_0 = \pi \left(\frac{35}{20} \right)^2 \int_0^{20} z^2 dz \approx 25656 \text{ [km}^3\text{,]}$$

$$V_i \approx 18362 \text{ [km}^3\text{,]}, i = 1, 2, 3$$

and

$$V = 3 \cdot V_i \approx 55088 \text{ [km}^3\text{].}$$

Thus, comparing $3V_0$ and V it can be seen that the total dead zone of RLSs are reduced by about 1.3 times.

From the comparison of the obtained numbers, it can be concluded that the creation of a radiolocation area by placing RLSs on the vertices of equilateral triangles (in

the form of a checkerboard) is more economically profitable, as it requires fewer stations.

Although advantageous in terms of cost savings, fig.-2 grouping does not satisfy other critical requirements. For example, the failure of any of the RLSs leads to the formation of large gaps in the radiolocation field. Losses of air targets during tracking will be observed even with the correct operation of all RLSs, since the "dead zone" in the sighting zones of RLSs are not closed.

If we also take into account the distortion of the visual zones of RLSs as a result of the influence of the nature of the relief around the positions, we can generally conclude that the grouping in Fig. 2 can be used only in exceptional cases- with an acute shortage of funds and in secondary areas, but their use at the forefront is not effective.

REFERENCES

- [1] E. G. Hashimov, and R.R . Maharramov. Methods of effective detection of unmanned aerial vehicles. *Проблеми інформатизації: тези доповідей 9-ї міжнародної науково-технічної конференції*. Том 1. Черкаси – Харків-Баку – Бельсько-Бяла (18-19 листопада, 2021), 2021, С. 118–119.
- [2] E. G. Hashimov, and R. R. Maharramov. Methods of effective influencing UAVs. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. *Матеріали 10-ї міжнародної науково-технічної конференції* (9–10 квітня, 2020). Том 1. Баку-Харків-Жиліна, 2020. С. 27.
- [3] E. G. Hashimov, and B. S. Huseynov. Some aspects of the combat capabilities and application of modern UAVs. 2021. Vol. 3(7). Pp. 14–24.
- [4] A. A. Bayramov, and E. G. Hashimov. The numerical estimation method of a task success of UAV reconnaissance flight in mountainous battle condition. *Сучасні інформаційні системи*. 2017. Vol. 1,2. С. 70–73.
- [5] Y. M. Genç, and E. Erciyes. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Threats and Security Management. *Türkiye Unmanned Aerial Vehicles Magazine*. 2020. Vol. 2(2). Pp. 36–42.
- [6] E. G. Hashimov, R. R. Maharramov, A. Muradov, and S V. Katekhliev. Methods of detection of UAVs operating in a dead zone through RLS. Patriotic war: 44-day victory chronicle, *Materials of the republican scientific-practical conference dedicated to the 2nd anniversary of the victory in the 44-day Patriotic War*. Baku (November 2–3, 2022), 2022. Pp. 176–178.
- [7] F. A. Aliev, and R. R. Maharramov. The detection of small unmanned aerial vehicles (UAV) by the radar stations. *Proceedings of the 8-th International Conference on control and optimization with industrial applications* (Baku, August 24–26, 2022), Baku, 2022. Vol. 2. Pp. 63–65.
- [8] E. G. Hashimov, and E. K. Khudeynatov. Evaluation of the application efficiency of UAV systems in modern wars. Baku : Military knowledge, 2022. Vol. 1. Pp. 11–17.
- [9] S.J.Jr Freedberg, *Dumb and cheap: When facing electronic warfare in Ukraine, small drones' quantity is quality*. [Online]. URL: <https://breakingdefense.com/2023/06/dumb-and-cheap-when-facing-electronic-warfare-in-ukraine-small-drones-quantity-is-quality/>. [Accessed: October 16, 2023].
- [10] Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2000–2025. [Online]. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA391358>. [Accessed: October 16, 2023].
- [11] What is the dead zone of RLS detection and how to determine it? [Online]. URL: <https://studfile.net/preview/8961005/page:11/>. [Accessed: October 16, 2023].
- [12] M. Brzozowski, M. Pakowski, M. Nowakowski, M. Myszka, M. Michalczewski. Radiolocation devices for detection and tracking small high-speed ballistic objects - features, applications, and methods of tests. *Sensors*. 2019. Vol. 19(24). 5362. URL: <https://doi.org/10.3390/s19245362>
- [13] S. Rosłonec. Radiolocation and Its Basic Principles. *Fundamentals of the Radiolocation and Radionavigation*. Springer Aerospace Technology. Cham : Springer Nature, 2023. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-10631-6_1.
- [14] A. A. Tomusyak, V. S. Trokhimenko, N. M. Shunda. Geometry. Part 1: Analytical geometry. Vinnitsa, 2002.
- [15] V. A. Dombrovsky, I. M. Krizhanivskiy, R. S. Mats'kiv, M. Migovich, V. M. Nemish et al. *Vishcha Mathematics: Podruchnik*. Ternopil : Vidavnistvo Karp'yuk, 2003.

Determining the location of the UAV equipped with a homing device based on radio beacons

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.013>

Elshan Hashimov

National Defense University,
Azerbaijan Technical University
Baku, Azerbaijan
hasimovel@gmail.com

Elkhan Sabziev

Military Scientific Research Institute
Institute of Control Systems
Baku, Azerbaijan
elkhan.sabziev@gmail.com

Samad Muradov

Military Scientific Research Institute
National Defense University
Baku, Azerbaijan
semedmuradov@yahoo.com

Abstract—The article describes radio beacon systems and presents a mathematical solution to determine the location of an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a direction-finding device. This system ensures continuous flight and allows for determining the exact coordinates of targets, regardless of satellite signals. It facilitates the successful completion of combat missions in adverse weather conditions and when using radio electronic warfare (REW) systems based on signals received from radio beacons.

Keywords—unmanned aerial vehicle (UAV), direction finder, beacon systems, radio beacons, navigation systems, air defense, radio electronic warfare (REW), GPS.

I. INTRODUCTION

The analysis of the development directions of the forms and methods of modern military operations shows that UAVs are now viewed as highly effective tools capable of solving a wide range of combat tasks. It is believed that in the near future, UAVs will play a significant role in determining the location of air defenses, silencing and destroying them, obtaining the exact coordinates of fortified enemy positions, as well as launching missiles and bombs at detected objects. Already, the course and outcome of military operations, the degree of army readiness for combat, and the ability to perform assigned tasks have begun to depend significantly on UAVs [1; 2]. Additionally, UAVs have become a powerful factor for commanders when deciding on the initiation of combat operations. They are subject to constant development and improvement, necessitating a careful and detailed analysis of all aspects of their application [3].

The control, navigation, and flight route planning of UAVs are typically reliant on real-time signals received from GPS. UAVs follow a predetermined flight path and can track their position based on GPS signals along the way. However, there are situations when GPS signals may not be available, such as in enclosed areas, during the application REW systems, in forested areas, or when flying between high buildings in residential areas [4; 5]. In these scenarios, significant obstacles hinder the flight of UAVs and their movement along

the route, potentially leading to the loss of the UAVs or its control by the enemy.

The article discusses the implementation of a stable navigation system in UAVs, enabling them to successfully perform tasks in challenging weather conditions, closed spaces, and even during the application of radio-electronic combat systems. This advanced system allows uninterrupted flight and precise target coordinate determination, regardless of satellite signals. To achieve this, UAVs are equipped with a direction-finding device, which offers a mathematical solution to determine their location based on signals received from ground-based beacons.

II. IMPORTANCE OF APPLICATION OF BEACON SYSTEMS

Beacon systems are one of the widely used technologies in modern times. The main advantage of their use is to establish a stable and reliable data network. Beacons play a critical role in many industries, particularly in technological fields that rely on precision navigation or search and rescue operations. These devices provide valuable information for vehicle management and enable safe and efficient navigation, even in the most challenging environments [6].

The most prevalent types of beacons in modern times are radio beacons. Additionally, radio beacons can be installed at key points along coastlines or strategic elevations, enabling rescue teams to quickly locate lost vehicles. When a distress signal is received from an aircraft or ship, search and rescue teams can utilize the radio beacon's signal to locate it. There are several types of radio beacons, each with unique capabilities and applications [7-9].

III. WORKING PRINCIPLE OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS

The main navigation system used in modern UAVs and airplanes is satellite navigation, which includes GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, and others. UAVs use a satellite receiver to capture these signals, and the distance to the GPS satellites is calculated

based on the time it takes for the signal to travel. To determine its position accurately in 3 dimensions (x, y, and z), the GPS receiver on the UAV must receive signals from at least 4 satellites.

Recently, the effectiveness of satellite navigation has been compromised due to the blocking of incoming signals caused by radio-electronic combat systems employed to thwart UAVs used for illicit purposes such as pillaging. When satellite signals are obstructed, determining the UAV's position becomes challenging.

To overcome this problem, a "beacon system" can be applied to UAVs, similar to the systems used for determining the correct position and direction of ships. In the absence of GPS signals, the UAV will automatically rely on signals from beacons to report its position and maintain navigation.

IV. MATHEMATICAL FORMALIZATION AND SOLUTION OF THE PROBLEM

Taking into account that the area over which the UAV flies for the purpose of monitoring is quite limited, the curvature of the Earth's surface in the observed area can be ignored. Therefore, let's enter a rectangular positive Oxy coordinate system with respect to the Earth in order to locate the beacons and the UAV.

It is assumed that the UAV regularly carries out the bearing of its surroundings at a full angle, and at this time it can stably receive the signal of at least $n \geq 3$ radio-beacons. Let us denote the full bearing period by T. It is assumed that at a certain time t, the UAV was at the point \tilde{A} , whose coordinates relative to the Oxy system are known (\tilde{x}, \tilde{y}) .

For simplicity, let's number the receiving stations as $k=1,2,3,\dots,n$ clockwise according to the sequence of UAV coverage. It is considered that the coordinates of the k th beacon related to the Oxy system are known and are accordingly (x_k, y_k) .

The angle between the direction beams of the UAV bearing towards the 1st, 2nd, 3rd, ..., nth station at the instant $t+T$ is $\varphi_{1,2}, \varphi_{2,3}, \dots, \varphi_{n-1,n}$.

Let us denote the coordinates of the UAV at the moment $t+T$ related to the Oxy system as $(\tilde{x}^T, \tilde{y}^T)$. Then, the issue of determining the location of the UAV equipped with a direction finder device on the basis of radio beacons can be expressed as follows:

It is necessary to find the coordinates $(\tilde{x}^T, \tilde{y}^T)$ of the UAV corresponding to the moment of time $t+T$ such that the remaining angle between the beams directed from that point to the k and (k+1)-th beacon is $\varphi_{k,k+1}$. The remaining angle between the beams directed towards the n th and 1st beacons be $\varphi_{n,1} = (2\pi - \sum_{k=1}^{n-2} \varphi_{k,k+1})$.

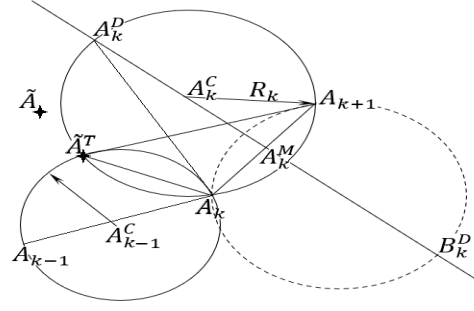


Figure 1. Determining the remaining angle between the beams.

To solve the problem, let's first determine the set of points that ensure that the angle $\varphi_{k,k+1}$ remains between the rays directed towards the k and (k+1)th beacon. Essentially, this set is a circle passing through the points $A_k(x_k, y_k), A_{k+1}(x_{k+1}, y_{k+1})$ $\vee \tilde{A}^T(\tilde{x}^T, \tilde{y}^T)$ consists of (figure 1). To write the equation of that circle, find the coordinates of the point $A_k^D(x_k^D, y_k^D)$ located on it, so that it is on the perpendicular raised from the middle of the straight line segment connecting the points A_k, A_{k+1} and $A_k A_k^D A_{k+1}$. Let the angle $A_k A_k^D A_{k+1}$ be equal to $\varphi_{k,k+1}$.

Let $A_k^M(x_k^M, y_k^M)$ be the middle point of the straight line segment connecting the points $A_k(x_k, y_k)$ $\vee A_{k+1}(x_{k+1}, y_{k+1})$. It is obvious that,

$$x_k^M = \frac{x_k + x_{k+1}}{2}, \quad y_k^M = \frac{y_k + y_{k+1}}{2}. \quad (1)$$

Let's write the equation of the straight line passing through the points $A_k^M(x_k^M, y_k^M)$ $\vee A_k^D(x_k^D, y_k^D)$ as follows:

$$(y_{k+1} - y_k)(y - y_k^M) + (x_{k+1} - x_k)(x - x_k^M) = 0. \quad (2)$$

$A_k A_k^D A_{k+1}$ the condition that the angle is $\varphi_{k,k+1}$ can be written as follows:

$$\frac{\varphi_{k,k+1}}{2} = \sqrt{\frac{(x_k^M - x_k)^2 + (y_k^M - y_k)^2}{(x_k^M - x_k^D)^2 + (y_k^M - y_k^D)^2}}$$

or

$$\begin{aligned} & \left((x_k^M - x_k^D)^2 + (y_k^M - y_k^D)^2 \right) \frac{\varphi_{k,k+1}}{2} \\ & = (x_k^M - x_k)^2 + (y_k^M - y_k)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Equations (2)-(3) are a system of algebraic equations of the second form with respect to the unknowns x_k^D, y_k^D , and it is clear that it has 2 solutions. Those solutions will correspond to the coordinates of points $A_k^D \vee B_k^D$, as shown in figure 1. According to the essence of the problem, the closest to the point $\tilde{A}(\tilde{x}, \tilde{y})$ should be chosen from the points $A_k^D \vee B_k^D$, in other words,

$$(x_k^D, y_k^D) = \arg \arg \left\{ |A_k^D - \tilde{A}|, |B_k^D - \tilde{A}| \right\}. \quad (4)$$

Suppose that the center of the circle passing through the points A_k, A_{k+1} $\vee \tilde{A}$ is located at the point $A_k^C(x_k^C, y_k^C)$. The coordinates of this point must satisfy the equation (2) and also satisfy the following equation,

which expresses the equality of the radii $A_k A_k^C$ vs $A_k^D A_k^C$:

$$\begin{aligned} (x_k^C - x_k^D)^2 + (y_k^C - y_k^D)^2 &= \\ &= (x_k^C - x_k)^2 + (y_k^C - y_k)^2. \end{aligned}$$

Thus, the calculation of coordinates x_k^C, y_k^C leads to the solution of the following system of linear algebraic equations:

$$\begin{cases} (x_{k+1} - x_k)x_k^C + (y_{k+1} - y_k)y_k^C = (x_{k+1} - x_k)x_k^M + (y_{k+1} - y_k)y_k^M, \\ 2(x_k^D - x_k)x_k^C + 2(y_k^D - y_k)y_k^C = (x_k^D)^2 + (y_k^D)^2 - x_k^2 - y_k^2. \end{cases} \quad (5)$$

Using the solution of system (5), we can write the equation of the circle with its center at the point A_k^C and passing through the points A_k, A_{k+1} :

$$(x - x_k^C)^2 + (y - y_k^C)^2 = R_k^2, \quad (6)$$

here $R_k = \sqrt{(x_k - x_k^C)^2 + (y_k - y_k^C)^2}$ - is the radius of the circle.

It is clear that the coordinates of the UAV corresponding to the moment T+t must satisfy equations (6) with a certain accuracy for each k. This means that the new coordinates of the UAV can be calculated as $(\tilde{x}^T, \tilde{y}^T)$ giving a minimum to the following functional:

$$J(\tilde{x}^T, \tilde{y}^T) = \sum_{k=1,2,\dots,n} \left\{ (\tilde{x}^T - x_k^C)^2 + (\tilde{y}^T - y_k^C)^2 - R^2 \right\}^2. \quad (7)$$

Numerical methods can be applied to find the minimum of the functional [10].

ACKNOWLEDGMENT

In order for UAVs to successfully perform their combat tasks in all operational conditions, it is possible to create stable navigation systems that ensure its uninterrupted flight and determine the exact coordinates of targets, regardless of satellite signals, in closed space and during REW. It is necessary to create new stable navigation systems for UAVs to successfully perform reconnaissance tasks without satellite signals. The biggest research effort against UAVs is to disable them by affecting their navigation systems and thereby

preventing their deployment. The development of radio-beacon systems and their integration into UAVs will greatly expand navigation capabilities.

Thus, a mathematical solution to the issue of determining the position of UAVs provided with a direction finder device using the equations shown in expressions (6) - (7) is provided. Using these equations, it is possible to use radio beacons as an additional navigation tool in an environment where there is no GPS.

REFERENCES

- [1] A. A. Bayramov, E. G. Hashimov, and Y. A. Nasibov, "Unmanned Aerial Vehicle Applications for Military GIS Task Solutions," Research Anthology on Reliability and Safety in Aviation Systems, Spacecraft, and Air Transport, 2021, pp. 1092–1115. DOI: 10.4018/978-1-5225-7709-6.ch010
- [2] E. Hashimov, and S. Muradov, "Analysis of the application of UAVs in modern wars," Military knowledge, vol. 1, 2023, pp. 7–16.
- [3] E. Hashimov, E. Sabziev, and B. Huseynov, "Determination of movement parameters of the target by the UAV performing the flight task," National security and military sciences, vol. 3(8), 2022, pp. 31–35.
- [4] E. Hashimov, and S. Muradov, "Application of stable navigation system in reconnaissance unmanned aerial vehicles," National security and military sciences," vol. 3(8), 2022, pp. 36–43.
- [5] A. A. Bayramov, and E. G. Hashimov, "The numerical estimation method of a task success of UAV reconnaissance flight in mountainous battle condition," Сучасні інформаційні системи, vol. 1(2), 2017, pp. 70–73. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/14f9ffe6-ab93-4995-b3f1-aefa743dd725/content>
- [6] "Beacon technology - what it is & why you need it." [Online]. Available: <https://www.plotprojects.com/blog/beacon-technology-why-the-market-is-booming/>. [Accessed: October 12, 2023].
- [7] "What are beacons, pros & cons and how much do they cost? The truth about beacon." [Online]. Available: <https://blesk.com/beacons.html>. [Accessed: October 12, 2023].
- [8] B.G. Ibrahimov, and A.M. Talibov, "Researches efficiency functioning systems processing's information flows automobile services," T-Comm, vol. 13(5), 2019, pp. 56–60.
- [9] B.G. Ibrahimov, and E.G. Hashimov, "Analysis and selection performance indicators multiservice communication networks based on the concept NGN and FN," Fifth International Scientific and Technical Conference "Computer and information systems and technologies", Kharkiv, 2021. pp. 96–98. <https://doi.org/10.30837/csitic52021232904>
- [10] Волонтир Л.О., Зелінська О.В., Потапова Н.А., Чіков І.А. Чисельні методи: навчальний посібник. Вінниця: Вінницький національний аграрний університет, 2020. 322 с.

Imaginary Intelligence Via Satellites

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.014>

Mugabil Huseynov

Military Scientific Research Institute
of National Defense University
Baku, Azerbaijan
huseynovmugabil@gmail.com

Elshan Hashimov

National Defense University
Azerbaijan Technical University
Baku, Azerbaijan
hasimovel@gmail.com

Abstract—This article gives basic information about all types of satellites. The types of satellites reveal the functions, purposes and applications. Information is provided on the sections required to use a satellite. The features of reconnaissance satellites are characterized. Analytical factors of satellite imagery, their pros and cons were compared. The role and functions of satellite imagery in current and probable future wars are declared

Keywords—component; satellite, reconnaissance satellite, active and passive satellites, satellite imagery, Russian-Ukrainian war.

I. INTRODUCTION

There is a lot of information about satellites nowadays. The use of this technology is very common today. Satellite is already familiar with all the structures. But people know little about the structure, function and purpose of this technology. There is very little information about the satellites used especially for military purposes and their working mechanism. It is useful to first learn basic information about satellites to know our capabilities and to further assess the enemy's capabilities.

II. SATELLITES

Objects orbiting around a celestial body in a circular or elliptical shape are called satellites. Satellites are naturally and artificially divided into two types.

Natural satellites: satellites that revolve around planets due to various natural causes during the period of the planets. The moon is a natural satellite of planet Earth, planet Earth is a natural satellite of the sun [7].

Artificial satellites: are satellites produced by humans for scientific research, communication or observation.

The world's first artificial satellite was launched into orbit by the USSR on 4 October 1957. The release of this satellite, which was announced as Sputnik-1, officially marked the beginning of the "space age" [6].

The main areas of utilization of services provided by satellite communication operators:

- Commercial
- Military
- Governmental
- Civilian

The satellites orbiting the Earth serve the following purposes:

- Communication and communication;
- Remotely observing the Earth's surface;
- Technology development;
- GPS navigation services;
- Technology Demonstration;
- Space Surveillance;
- Space research;
- Surface Science Research [5].

Since near-Earth satellites are more susceptible to gravity, they are forced to rotate faster to balance this force. Thus, satellites close to Earth have a higher Earth rotation rate, while distant satellites have a slower or synchronous rotation rate [7].

Artificial satellites move in four orbits around the Earth:

- low Earth orbit (LEO);
- medium Earth orbit (MEO);
- highly elliptical orbit (HEO);
- geosynchronous orbit (GSO) / geostationary orbit (GEO) [5].

III. SATELLITE STRUCTURE

Satellites consist of three parts: the service section, the operational payload and the mechanical section.

Service Section:

The Satellite Servicing Section is the unit that keeps the satellite in space, balances its movements, and communicates with stations on the ground. This section consists of the engine system, the attitude control system, and the thermal management system.

Operational payload:

Satellites are lifted into space for a variety of reasons. Satellites lifted into space for warning purposes provide warning between two regions. A satellite lifted into space for reconnaissance purposes acquires various images on the ground and provides transmission to a ground station. The systems installed for the purpose of

space-lifting satellites, i.e. for mission tasks, are called the operational payloads [5].

Mechanical section:

The mechanical section connects the satellite dish, solar panels, receivers and other electronic systems and balances their loads as they ascend into space.

Satellite classification:

The classification of satellites by size is as follows

- Very heavy satellites – weighing up to 7000 kg;
- Heavy satellites – weighing up to 5001–7000 kg;
- Large satellites – weighing up to 4201–5000 kg;
- Intermediate satellites – weighing up to 2501–4200 kg;
- Medium satellites – weighing up to 1201–2500 kg;
- Small satellites – weighing up to 601–1200 kg;
- Mini-satellites – weighing up to 201–600 kg;
- Micro-satellites – weighing up to 11–200 kg;
- Nanosatellites – weighing up to 1.1–10 kg;
- Pico satellites – weighing up to 0.1–1 kilograms;
- Femto-satellites – weighing up to 0.1 kg [7].

Nowadays, due to ease of use and spatial elevation as well as cost effectiveness, small satellites are considered more suitable. Satellites are classified as scientific research satellites, meteorological satellites, positioning satellites, news satellites and remote reception satellites for use.

One of the most widely used areas of these systems, which has developed rapidly since World War II, is the military field. It works with electromagnetic energy emitted or reflected by objects.

In 1994, France, Russia, Israel, Brazil, China, India, Japan and Russia developed their own imaging satellites, The decision by the US Congress in February 1995 to release satellite images smaller than 1 meter was a major turning point in the field of imaging and target assessment [13].

IV. RECONNAISSANCE-SATELLITE SURVEILLANCE AND SATELLITE IMAGERY

The first reconnaissance satellite was launched into orbit by the United States in 1960. This satellite, known as CORONA, was designed to receive images from the USSR and other foreign countries. These images were then used to identify military installations and other strategic targets. This was the beginning of the era of satellite reconnaissance [3].

Despite its recent history, rapid advances in technology may make it worthwhile to explore the use of satellite imagery in terms of topographic applications within three generations [8].

Satellite images of the first generation (197–1982) – the most significant satellites of this generation are Landsat-1, 2 and 3, Skylab and Soyuz. The main purpose of using these satellites was to produce small and medium size maps of the Earth with images acquired by receivers (sensors) with a visibility capability of 30 meters. However, a limited number of maps such as 1:250,000 and 1:500,000 could be made from the acquired images.

Second Generation Satellite Images (1982–1997) – The most important of these generations of satellites are Landsat-4 and 5, SPOT-1, 2 and 3, Space Shuttle, Soyuz, Salyut, Space and ERS-1 satellites can be noted. In particular, the images of these satellites, which were aimed at printing large scale maps such as 1:50,000 and 1:100,000 and updating existing maps, are much improved compared to the first generation satellite images [8].

Satellite images of the third generation (1997 and later periods) - Ikonos, EarlyBird, QuickBird, Landsat-7, SPOT-5, IRS-1C, as the most important of the satellites of this generation, Aster satellites can be recorded. In particular, the images obtained from these satellites can be used in the preparation of topographic maps at a scale of 1:10000 to 1:25000. The satellites of this generation had the greatest factor that distinguished them from others – the ability to distinguish by 0.5–1 meters in the received panchromatic images and by 2 meters in the multispectral images [8].

Receivers (sensors):

Reconnaissance and surveillance satellites use two types of receivers (sensors) for passive and active operation [4].

1. Passive receivers (sensors) are microwave instruments designed to receive and measure natural emissions generated by the earth's surface and its atmospheric components. In short, these types of receivers require an external energy source (basic sunlight) to operate [2].
2. Active receivers (sensors) are a radar device used to measure signals transmitted by a sensor, reflected by the ground surface or atmosphere, broken or scattered. Briefly, these types of receivers produce the necessary energy themselves and send it to the object [2].

Passive receivers:

- Optical and electro-optical

Active receivers:

- SAR
- LIDAR

Types of images obtained from passive receivers (sensors)

- Single band image (Panchromatic)
- Multi-band image
- Multispectral image
- Hyperspectral image [3].

Modeling, control and information technologies – 2023

V. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF SATELLITE IMAGERY

Advantages:

1. It is easy to obtain and utilize due to the development of modern technology;
2. It can cover a large territorial unit outside of a period of peace or war;
3. Has the ability to conduct reconnaissance and surveillance at any depth and without trespassing;
4. Has the ability to acquire real time images from the sensors they carry;
5. Detailed analyses are provided in conjunction with data from other intelligence activities;
6. It has broad control over all elements in our area of interest;
7. Most of the operational satellites have the ability to image the same area over a time interval ranging from 1-2 to 30 days;
8. The level of reliability and accuracy is the highest;
9. Since the acquired images are in digital format, there is no need for additional costs such as digitizing the product [3].

Disadvantages:

1. Expensive, maintenance requires some time and financial resources;
2. Some receivers are sensitive to the effects (sensors) of atmospheric and meteorological agents;
3. Camouflage measures used by the enemy have a negative effect;
4. It is difficult and expensive to obtain continuous images to track moving targets;
5. Specially trained personnel and software are needed to analyze the acquired images;
6. Can be deceptive like other types of reconnaissance;
7. Image readiness for use may not fulfil immediate needs as time will be required.

Eight main key factors to help evaluate and analyze the acquired images:

1. A figure shows the boundary lines, shape, or appearance of a target;
 2. Magnitude is the size of an object and the area it covers;
 3. Pattern is the systematic arrangement of bodies on the ground in a unique way;
 4. Tone expresses the brightness of the light reflected from the target and the color visible in the image. This factor is influenced by a number of external factors:
- Meteorological conditions;

- Time of image output;
 - Seasons;
 - Brightness;
 - The surface structure of the object.
5. Shadow is that the sunlight falling directly on the target reflects a clear image of the target on the ground surface;
 6. Relation to the environment, to identify an object or region, comparisons must be made to determine what other existing factors are related to that object or region and why they are used;
 7. Location is a position that takes into account other factors that exist near one of the targets;
 8. Structure is the imaginary part of the objectives visible in the image.

The most important factor for personnel directly involved in the evaluation of the acquired images is the quality of the acquired image and minimal scalability. These features form the basis of the evaluation. The definition of bodies in the image taking into account the mentioned ones is as follows:

Resolution and accuracy of the images are first important thing for person who is dealing directly with interpreting (reading, analyzing) images. Those specifications are main issue of imaginary inelegancy. According abovementioned issues decertation of things on image should be done as follow steps.

- Recognition is to determine whether an object belongs to an image. (e.g. tank, single lane bridge etc.).
- Diagnosis is to determine whether the object in the image belongs to a certain type (T-72 tank, MIG-29 fighter jet, etc.).
- Technical analysis is a detailed disclosure of the characteristics of the object in the image.

Areas used for satellite imagery reconnaissance:

- Deep target detection;
- Determination of target location and structure;
- Determination of target coordinates;
- Preparation of target area model.
-

VI. SATELLITE IMAGERY USE IN RUSSIAN-UKRAINIAN WAR

In November 2021, Russia deployed between 100,000 and 150,000 armies in undercover training to Ukraine's borders. On 15 February 2022, Russian President Vladimir Putin officially announced that he had withdrawn his army from the Ukrainian border. In response, Ukrainian, American and British intelligence agencies claimed that troops had not been withdrawn from the region based on satellite imagery, and they shared satellite imagery with the global community via social media to confirm the data [9].

It is known that some independent operators (companies) such as Capella Space, ICEEYE and Satellogic are officially co-operating with the Ukrainian state. Many independent companies voluntarily support Ukraine, and these companies are cleverly using the situation to both demonstrate their abilities and develop their capabilities. By sharing satellite images of Russia's military aggression against Ukraine on social media, they draw the world's attention to the conflict and also show that the news they are spreading through the images is absolutely true [10].

In addition to these companies, Google has made objects belonging to the Russian army visible in its Google Maps application, taking the stealth function over the objects [11].

During the Ukrainian-Russian war, the use of a number of activities such as monitoring the progress of operations with satellite material, obtaining intelligence information, evaluating the results of firing, detecting and evaluating targets, were publicized in social networks. It is well known that satellite imagery has played an important role in recent wars and it has been used for special purposes, but never military analyzed satellite images have been published on social networks during any war. It is indicating that the development and widespread use of technology such as satellite imagery should be considered in war tactics and Military Decision Making Process.

One of the three main experiments learnt from the Russian-Ukrainian war is the transparency of the war zone. Now days you can get images of battle field and whole area of interest from satellite easily [12]. This shows that the wars of the future will involve species intelligence. The main effort will be focus on how to get information faster and before than enemy. It means that future operations will be more depend on reconnaissance.

VII. CONCLUSIONS

- All the systems mentioned have the capability to immediately transmit the received data to the respective stations in real time form or real time with data linking capabilities.
- The systems are aimed at detecting all military or civilian targets or activities and can operate day and night.
- Natural phenomena (bad weather, fog, etc.) Actions to address the impact on the systems are ongoing.
- More emphasis is being placed on developing systems that can be used in a coordinated manner with other systems.
- UAV and satellite imagery have become more widely used.
- Satellite imagery has become more widely used in modern warfare. Satellite planning should be

considered in the ongoing military decision-making process. Two factors need to be addressed here. One is the planning and analysis of satellite imagery in operational planning and progress, and the other is the consideration of the timing of their implementation, and the second is the consideration that the adversary also receives satellite imagery. There is a mechanism for acquiring and analysing satellite imagery and reporting the results, and the need to calculate the time required to implement this process.

The future war will involve satellite imagery, privacy and surprise will often be impossible, and there will be a greater need for the ability to detect not the enemy but the ability to detect faster than the enemy.

REFERENCES

- [1] M. Frackiewicz. *The History and Evolution of Spy Satellites*. [Online]. URL: <https://ts2.space/en/the-history-and-evolution-of-spy-satellites/>. (Accessed: October 13, 2023).
- [2] C. G. Manning, *What are passive and active sensors?* [Online]. URL: <https://www.nasa.gov/general/what-are-passive-and-active-sensors/>. (Accessed: October 13, 2023).
- [3] KKY 30-7-1, Görüntü ve Hedef İstihbaratı Uygulamaları Yardımcı Yayını. (Imaginary And Targeting Intelligence Applications, support volume), Ankara, 2008.
- [4] KKY 30-4, Hava Foto Keşif ve Kıymetlendirme Yönergesi, (Aerial Photography Reconnaissance and Evaluating Doctrine), Ankara, 2001.
- [5] P. Rome, *Every Satellite Orbiting Earth and Who Owns Them*. [Online]. Available: <https://dewesoft.com/blog/every-satellite-orbiting-earth-and-who-owns-them>. (Accessed: October 13, 2023).
- [6] A. Onion, M. Sullivan, M. Mullen and C. Zapata, *This Day In History*. [Online]. Available: <https://www.history.com/this-day-in-history/sputnik-launched>. (Accessed: October 13, 2023).
- [7] ANUM, *Satellite: Definition, Types, & Facts*. [Online]. URL: <https://www.embibe.com/exams/satellite/>. (Accessed: October 13, 2023).
- [8] H. Çelik and F. Yıldız, *Investigation of the accuracy of orthoimages produced from Aster satellite imagery*. [Online]. URL: <https://harita.gov.tr/uploads/files/articles/aster-uydu-goruntulerinden-uretilen-ortofotolarin-dogrulugunun-arastirilmesi-1063.pdf>. (Accessed: October 13, 2023).
- [9] F. Gardner. *According to satellite images, Russia's presence on the Ukrainian border continues*. [Online]. URL: <https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-60431937>. (Accessed: October 13, 2023).
- [10] A. Datta. *GeoInt, OSINT Comes Off Age For Near Real Time Coverage of Ukraine Conflict*. [Online]. URL: <https://www.geospatialworld.net/blogs/geoint-osint-comes-off-age-of-ukraine-conflict/>. (Accessed: October 13, 2023).
- [11] A. Kholodnova. *Google Maps has opened all military and strategic sites in Russia*. [Online]. URL: <https://babel.ua/en/news/77843-google-maps-has-opened-all-military-and-strategic-sites-in-russia-now-everyone-can-see-them-in-good-quality>. (Accessed: October 13, 2023).
- [12] The future of war. *The Economist, A Special Report*. 2023. Pp. 1–11.
- [13] Y. Dehqanzada, and A. Florini. *Secrets for sale: How commercial satellite imagery will change the world*. Washington, DC : Carnegie Endowment for International Peace, 2000.

About approach to solution of the traveling salesman problem based on the annealing method with the fuzziness of the time perception

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.015>

Ivohin E.V.

Department of Computer Sciences and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
ivohin@univ.kiev.ua

Rets V.O.

Department of Computer Sciences and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
vadym.rets@gmail.com

Adzhubey L.T.

Department of Computer Sciences and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
adzhubey@ukr.net

Abstract—This paper investigates the use of fuzzy numbers and the annealing method to find a solution to the traveling salesman problem, which involves finding the shortest time route for a given set of cities. Fuzzy numbers are used to model the inaccuracy and uncertainty of input data, and an annealing method is proposed to find solutions. A comparison of the results of the TSP problem using crisp and fuzzy numbers using the annealing method was carried out. The results of numerical experiments are given, which show that the use of fuzzy numbers, in particular triangular and parabolic, with the annealing method leads to a significant improvement in the results of the TSP problem compared to the use of crisp numbers.

Keywords—traveling salesman problem, annealing method, time fuzziness.

I. INTRODUCTION

The way decisions are made in society in many cases depends on the emotional state of a person. Feelings are like a reference point that is determined by a goal that is influenced by various factors. Emotions can be the reason for behavior that is appropriate for a particular situation, even when it is not the most efficient, but allows you to avoid any consequences that may arise from exceeding a certain time limit.

Special attention should be paid to these factors in the processes of formation and improvement of many theoretical ideas in the field of modeling human behavior, one of which is the adaptation of physical and mathematical models to real life. This makes it possible to combine the power of computational methods with the peculiarities of human behavior. Such tasks are common in the context of the application of artificial intelligence methods and algorithms, the creation of decision-making support systems, the resolution of

resource allocation issues taking into account the human factor, etc.

Time is an important resource in activities involving human participation. Estimation of time intervals is fundamental to understanding time frames, even though the exact boundaries of the interval may not be defined until the process reaches a certain stage. Thus, a period of time is usually defined by an indefinite interval that can be roughly predicted given the nature of the passage of time, if the given limits of the interval are taken as a given. To measure time intervals, they can be expressed in phrases such as "quick response", "normal timing" or "long wait". This means that when solving problems that require verbal terms to refer to time, it is important to take time variation into account. It is clear that emotions have a great influence on the understanding of time in processes that involve a person [1].

In order to find the most successful or effective solution to problems, it is necessary to take into account factors that affect human emotions and, therefore, the speed of time perception, resource allocation and calendar planning. The paper proposes to develop an approach to the formalization of accounting for the flow of time based on fuzzy numbers and to apply it to solving certain fuzzy optimization problems related to taking into account the fuzzy perception of time arising from the subjectivity and irregularity of the time count.

II. TRAVELING SALESMAN PROBLEM WITH TIME CRITERIA

According to the content of the traveling salesman problem (TSP, Traveling Salesman Problem) [2], it is necessary to create a route of movement within a given set of interconnected points (bridges) that form the transport network of a particular region. A feature of the problem is that the route must contain all the points

specified in the task, and each of the points must be visited no more than once. It is clear that such trips take a lot of time, so it is logical that it is necessary to plan the route in such a way that the distance to be covered, or the time to overcome it, is minimal (finding the path with the least cost can be also considered as a criterion).

The traveling salesman problem is a combinatorial problem that can be solved using mathematical programming methods. To reduce the problem to a general form, we number the cities by numbers $(1, 2, 3, \dots, n)$, and describe the traveling salesman's route by a cyclic permutation of numbers $t = (j_1, j_2, \dots, j_n, j_1)$, where all j_1, \dots, j_n are different numbers. The number j_1 , repeated from the very beginning and at the end, shows that the permutation is cyclic.

The set of cities can be considered as the vertices of some graph with given distances (or travel time) between all pairs of vertices c_{ij} that form the matrix $C = (c_{ij})$, $i, j = \overline{1, n}$. We assume that the matrix is symmetric. The formal problem then is to find the shortest route (in time) t that goes through each city and ends at the starting point. In this formulation, the problem is called the closed traveling salesman problem, which is a well-known mathematical integer programming problem.

Let us formulate a mathematical model of the TSP problem. Let $I = \{1, \dots, n\}$ be the set of vertex indices of the problem graph. The objective function is the total time of the route, including all the vertices of the task graph. The parameters of the problem are the elements of the matrix $C = (c_{ij})$, $i, j \in I$.

Shift tasks are elements of the binary matrix of transitions between vertices $X = \{x_{ij}\}$, $i, j \in I$, which are equal to 1 if there is an edge (v_i, v_j) in the constructed route for the task, 0 otherwise. The shortest route in terms of time is optimal:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

with constraints $\sum_{j \in I, j \neq i} x_{ij} = 1, i \in I,$

$$\sum_{i \in I, i \neq j} x_{ij} = 1, j \in I, \quad (2)$$

$$v_i - v_j + nx_{ij} \leq n - 1, 1 \leq i \neq j \leq n.$$

The last inequality ensures the connectivity of the vertex traversal route; it cannot consist of two or more unconnected parts.

The formulated optimization problem can be solved using a greedy algorithm or any of the available optimization algorithms such as genetic algorithm, tabu search, ant colony optimization, branch-and-bound algorithm, etc. [3].

A. Annealing method

One of the methods of solving the traveling salesman problem using the combinatorial optimization technique is the annealing method. By analogy with the

annealing process of various physical materials, in which by raising its temperature to a high level and then gradually lowering it, the algorithm accidentally disturbs the output path ("heating") for further gradual lowering of the "temperature" [4].

When modeling the annealing process, the analog of temperature is the level of randomness, with the help of which changes are made to the path, which in the future improves in its duration. When the "temperature" of the process is high, changes occur to avoid the danger of reaching a local minimum, followed by control at the optimal value as the "temperature" is successively reduced. "Temperature" decays in a series of steps on an exponential decay curve, with each step the temperature being lower than before.

B. Fuzzy passage of time

In everyday life, expressions such as "almost six", "quite tall", "not short enough" are often used to define a certain size in an approximate format. As a result, this method of evaluation requires the formalization of insufficiently clearly defined evaluations for their practical application in mathematical models. For this purpose, you can use concepts that allow you to present the subjective or intuitive meaning of fuzzy concepts in a constructive way. One of these concepts of uncertainty formalization is fuzzy numbers [5].

Fuzzy numbers are used to obtain results in problems related to decision-making and analysis. Fuzzy numbers defined in the number space are an extension of real numbers and have their own properties that can be attributed to number theory. To understand fuzzy numbers and their subspecies - triangular and parabolic numbers, consider the concept of a fuzzy set.

Let E be a set with a finite or infinite number of elements. Let A be the set contained in E . Then the set of ordered pairs $(x, \mu_{\tilde{A}}(x))$ defines a fuzzy subset \tilde{A} for E , where x – is a member of E , and $\mu_{\tilde{A}}(x)$ – degree of belonging of x to A . The set of elements from A for which $\mu_{\tilde{A}}(x) > 0$, form the carrier of a vague set (reference set).

A fuzzy number is a generalization of an ordinary real number. It refers to a connected set of possible values, where each possible value has its own weight between 0 and 1. Thus, a fuzzy number is a special case of a convex normalized fuzzy set in the space of real numbers. Among the possible types of fuzzy numbers, triangular and parabolic numbers were considered.

A fuzzy number $\tilde{A} = (a, b, c)$ is called a triangular fuzzy number if its membership function looks like this:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a; \\ (x-a)/(b-a), & a \leq x \leq b; \\ (c-x)/(c-b), & b \leq x \leq c; \\ 0, & x > c. \end{cases} \quad (3)$$

Above the triangular numbers (Fig. 1), you can determine the main arithmetic operations for further use in calculations.

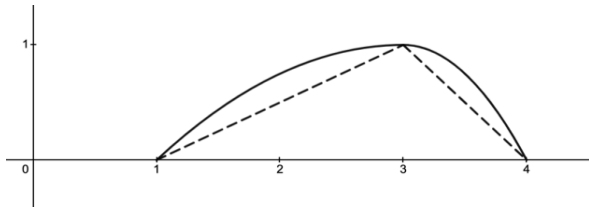


Figure 1. Example of triangle and parabolic fuzzy number

Let $A = (a, b, c)$ and $B = (a1, b1, c1)$ be two triangular numbers. Then

- the sum is defined as $A + B = (a+a1, b+b1, c+c1)$;
- the difference is defined as $A - B = A + (-B) = (a-c1, b-b1, c-a1)$, where $-B = (-c1, -b1, -a1)$ is defined as the opposite of B .

In other words, opposite triangular numbers and their sum and difference are also triangular numbers. It is also worth noting that the results of inversion and multiplication of triangular numbers do not preserve this property and do not always represent triangular numbers.

The parabolic number (Fig. 1) is given similarly and has the same properties, but has a different membership function

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a, \\ -((x-b)/(a-b))^2 + 1, & a \leq x \leq b, \\ -((x-b)/(c-b))^2 + 1, & b \leq x \leq c, \\ 0, & x > c. \end{cases} \quad (4)$$

Although uncertainty information can be formalized using fuzzy numbers, the decision-making procedure must be clear. For example, the final output of fuzzy systems and the selection of appropriate solutions should be justified on the basis of the value characterized by the confidence (importance) indicator. To obtain a clear value, methods of calculating ranks (defuzzification) of fuzzy numbers are used, which are essentially clear representative numbers, and can be used as generalized values for further calculations. One of the methods for calculating the rank of a fuzzy number is the Jaeger method, which calculates the Jaeger rank of the first type in the form [6]

$$FI(\tilde{A}) = \frac{\int_0^1 g(x)\mu_{\tilde{A}}(x)dx}{\int_0^1 \mu_{\tilde{A}}(x)dx},$$

where $g(x)$ is a weight function that measures the importance of the value of x .

This method of defuzzification is also called the method of the center of gravity (COG) [7] (Fig. 2). Among other well-known methods, it is also worth noting the bisector of area (BOA) method [8], according to which there is such a value of x that a vertical line drawn through it divides the fuzzy number into two equal parts by their area.

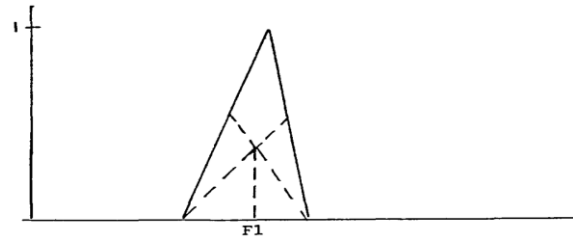


Figure 2. Defuzzification by method of the gravity center

III. PROPOSAL

Given that the "cost" of travel between cities in time measurement can vary depending on the situation, a more accurate representation of such cost can be given in the form of triangular or parabolic numbers. If the subjective perception of time is chosen as the value, the relative duration of the trip between cities may vary depending on the factors affecting the path - traffic jams, bad weather, etc. Note that even in a simpler perception of the dynamic duration of the road between cities, when the actual time required to cover the path at the recommended average speed is measured, the same factors change the given duration, and therefore it makes sense to represent the studied travel time in the form of triangular or parabolic numbers.

Using one of the combinatorial methods of the approximate solution of the traveling salesman problem in combination with fuzzy numbers (and the corresponding method of calculating their rank), it is possible to achieve an effective result from the construction of the optimal path taking into account the dynamic features of roads between destinations. At the same time, better calculations can be obtained when using fuzzy parabolic numbers, since their essence is closer to reality. For the subjective overestimation or underestimation of the perception of the passage of time, the rule is valid: the greater the possible deviation in perception, the less likely it is to be obtained. For the implementation of the actions of the annealing algorithm on fuzzy numbers that determine the time perception of the duration of movement between cities, operations according to the above schemes are used, and the different routes formed at the same time are compared with each other by finding and comparing the ranks of fuzzy numbers using one of the specified methods.

IV. RESULTS

In the course of the study, the described algorithm was implemented based on the annealing method using fuzzy numbers to represent the subjective perception of the passage of time on road sections between cities. A multi-threaded Python implementation is proposed for numerical calculations. In the process of work, the method of calculating the rank of fuzzy numbers is chosen and the rank values of different methods (use of the peak abscissa, BOA, COG) are compared with the average value of random route passes. It was concluded that the best result was obtained by the center of gravity (COG) method. A comparison of the route estimation methods is given in the table, where the random route characterizes the time of travel along the route taking into account the average speed, the calculated route is

the duration estimate obtained by the chosen method (see table I).

TABLE I. RESULTS

Method	Random route	Calculated route
The peak abscissa	5367.78	5046.0
BOA (triangular FN)	5332.54	5291.72
BOA (parabolic FN)	5369.91	5341.70
COG (triangular FN)	5332.40	5332.86
COG (parabolic FN)	5369.67	5368.72

During the program processing, three possible approaches to finding solutions are compared (using crisp, triangular, and parabolic numbers, respectively). As initial conditions, the TSPLib library was used, which has known TSP conditions in its catalog in the form of arrays of coordinates or matrices of conditional distances between cities (e.g. u16, fr4, etc.). Fuzzy initial conditions were randomly generated with possible deviation from the expected value in either direction. To test the proposed approach, the time of the best constructed results for each type of fuzzy numbers was compared with the average value of the time taken for 10⁵ random passes along the constructed route. The results of the work are shown in the table II:

TABLE II.

Task	Fuzzy number type	Estimated time	Actual time
u16	crisp	6859.0	7247.38
	triangular	6859.0	7129.38
	parabolic	6859.0	7128.92
gr4	crisp	5046.0	5369.57
	triangular	5071.0	5369.30
	parabolic	5070.0	5363.88
pr76	crisp	108273.0	115105.75
	triangular	108894.0	114102.55
	parabolic	109295.0	114563.41
rd100	crisp	8185.0	8653.50
	triangular	7975.0	8390.85
	parabolic	8049.0	8447.22
rd400	crisp	18070.0	19087.33
	triangular	18089.0	19008.33
	parabolic	17808.0	18713.72

Thus, it was concluded that the use of fuzzy numbers in the annealing algorithm allows to obtain constructive results when solving the traveling salesman problem with fuzzy input parameters.

V. CONCLUSIONS

This paper investigates the use of fuzzy numbers and the annealing method to find a solution to the traveling salesman problem, which involves finding the shortest time route for a given set of cities. Fuzzy numbers are used to model the inaccuracy and uncertainty of input data, and an annealing method is proposed to find solutions. The solutions obtained on the basis of the developed program in the Python language were

analyzed. A comparison of the results of the TSP problem using crisp and fuzzy numbers using the annealing method was carried out. The results of numerical experiments are given, which show that the use of fuzzy numbers, in particular triangular and parabolic, with the annealing method leads to a significant improvement in the results of the TSP problem compared to the use of crisp numbers. This approach can be applied to real-world optimization problems involving imprecise or uncertain data and can be useful for optimizing processes with subjective time perception. A conclusion was made about the need for further research using the theory of fuzzy numbers, in particular in the direction of the correct choice of the type of numbers in accordance with the conditions of the task.

REFERENCES

- [1] A. Schirmer. How emotions change time. *Frontiers in Integrative Neuroscience*. 2011. Vol. 5. Pp. 58.
- [2] A. Schrijver. On the history of combinatorial optimization (till 1960). *Handbooks in Operations Research and Management Science / K. Aardal, G.L. Nemhauser and R. Weismantel, Eds.* Amsterdam : Elsevier, 2005. Vol. 12. Pp. 1–68.
- [3] R. Matai, S. P. Singh, and M. L. Mittal. Traveling salesman problem: an overview of applications, formulations, and solution approaches. *Traveling salesman problem, theory and applications*. 2010. Vol. 1. Pp. 11–17.
- [4] P. Grabusts, J. Musatovs, and V. Golenkov. The application of simulated annealing method for optimal route detection between objects. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. Pp. 95–101.
- [5] S. Heilpern. Representation and application of fuzzy numbers. *Fuzzy sets and Systems*. 1997. Vol. 91(2). Pp. 259–268.
- [6] L. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. Pp. 338–353.
- [7] T. Allahviranloo, and R. Saneifard. Defuzzification method for ranking fuzzy numbers based on center of gravity. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*. 2012. Vol. 9(6). Pp. 57–67.
- [8] A. M. Nejad, and M. Mashinchi. Ranking fuzzy numbers based on the areas on the left and the right sides of fuzzy number. *Computers & Mathematics with Applications*. 2011. Vol. 61(2). Pp. 431–442.

Equilibrium state as a compromise in the struggle of opponents

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.016>

Tetyana Karatayeva
Institute of Mathematics of
the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
karat@imath.kiev.ua

Volodymyr Koshmanenko
Institute of Mathematics of
the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
koshman63@gmail.com

Oksana Satur
Institute of Mathematics of
the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
oksana@satur.in.ua

Abstract—Mathematical models describing the conflict interaction between alternative opponents are studied. It is assumed that the adversaries are indestructible, located in different regions of the resource space, and receive external support in their struggle with each other. The main questions concern the compromise states of equilibrium (a certain type of fixed points) of the associated dynamic conflict system. Namely, the existence of such states, their stability, and the dominant side in each region. It has been established that states of equilibrium compromise arise only in the presence of external influences (supports) necessarily for both opponents and only some of them are stable with non-trivial basins of attraction. It was also found that with insufficient external support, the dominant opponent in each of the regions can sharply lose its position.

Keywords—dynamical system of conflict, law of conflict interaction, stochastic vector, limit state, fixed point, equilibrium, compromise, stability, discrete measure, dissemination of beliefs.

We study the mathematical models of dynamical system describing the conflict interaction between alternative opponents. It is assumed that opponents are not destroyed and receive various external supports in different regions Ω_i of their life space

$$\Omega = \bigcup_{i=1}^{\infty} \Omega_i, \quad 2 \leq m < \infty.$$

Under different external influences (supports) for both opponents we establish the existence of equilibrium (compromise states) for such system.

The law of conflict interaction between a couple of alternative opponents, say A and B, has the view

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_i^A &= \lambda P_i^A (1 - P_i^B), \\ \frac{d}{dt} P_i^B &= \lambda P_i^B (1 - P_i^A), \quad i \in \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (1)$$

where $P_i^A \equiv P^A(\Omega_i, t)$ ($P_i^B \equiv P^B(\Omega_i, t)$) denotes an independent probability presence of opponent A (B) in the region Ω_i at time t (λ stands for the probability normalization). Law (1) has the following heuristic interpretation: which of the adversaries A or B should be or not be in each of the regions Ω_i at time t after each act of the battle?

Actually, here we use discrete time and therefore the above system $2m$ of differential equations (1) are transformed into a system of difference equations through the coordinates of stochastic vectors $\mathbf{p}^t = (p_1^t, \dots, p_m^t)$, $\mathbf{r}^t = (r_1^t, \dots, r_m^t)$ from the space $\mathbb{R}_{+,1}^m$:

$$\begin{aligned} p_i^{t+1} &= \lambda p_i^t (1 - r_i^t), \\ r_i^{t+1} &= \lambda r_i^t (1 - p_i^t), \quad t=0, 1, \dots, \end{aligned} \quad (2)$$

where $p_i^t \equiv P^A(\Omega_i, t)$, $r_i^t \equiv P^B(\Omega_i, t)$. Due to normalization, we have:

$$\sum_{i=1}^m p_i^t = 1 = \sum_{i=1}^m r_i^t.$$

It is worth noting that dynamical systems of conflict in the form

$$\{\mathbf{p}^t, \mathbf{r}^t\} \rightarrow \{\mathbf{p}^{t+1}, \mathbf{r}^{t+1}\}, \quad t = 0, 1, \dots$$

have already been investigated in a number of publications (see [1-8] and the references given there). The basic result confirms the convergence of trajectories of such systems to equilibrium states. This result is known as the Conflict Theorem. It can be formulated shortly as follows.

Each trajectory $\{\mathbf{p}^t, \mathbf{r}^t\}$ of the dynamical system of conflict generated by the system of equations (2) with an arbitrary starting point $\{\mathbf{p}^0, \mathbf{r}^0\}$ given by a pair of stochastic vectors $\mathbf{p}^0, \mathbf{r}^0 \in \mathbb{R}_{+,1}^m$ such that $(\mathbf{p}^0, \mathbf{r}^0) \neq \mathbf{1}$, converges to the limit state (fixed point),

$$\{\mathbf{p}^t, \mathbf{r}^t\} \rightarrow \{\mathbf{p}^\infty, \mathbf{r}^\infty\}, \quad t \rightarrow \infty,$$

which consists of two orthogonal vectors, $\mathbf{p}^\infty \perp \mathbf{r}^\infty$.

Thus, only one of the opponents A or B can be remained in each region. That is, one of the two is always fulfilled, $p_i^\infty \geq 0, r_i^\infty = 0$, or $p_i^\infty = 0, r_i^\infty \geq 0$. There is no compromise in any of areas. Therefore, it is impossible that both limiting coordinates values $p_i^\infty > 0, r_i^\infty > 0$ are non-zero.

The question of the existence of balanced compromise states, when the struggle of the enemies ends not with victory or defeat, but with the constant presence of both opponents in at least one disputed region, has a positive answer only if the opponents receive (external) help (reinforcement). Mathematically, this is written by entering coordinates shifts in the vectors of the probability of the presence of opponents in different regions:

$$p_i^t + h_{pi}, \quad r_i^t + h_{ri}.$$

Such shifts which produced by the external resource generate some kind of attraction for both of opponents. We remark that a series of models with pure attractive interaction have already been investigated in the works [9-11]. Here we show that the above attraction able to lead to compromise equilibrium. Our new result establishes the existence of compromise states (simultaneous presence of opponents in a fixed region) under receiving of external help for both ones.

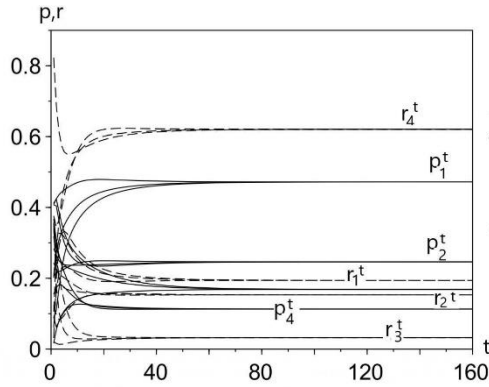


Figure 1. An example of a limit compromise equilibrium when coordinates shifts are non-zero in all regions

The dynamical equations with external interference have the form

$$p_i^{t+1} = \frac{(p_i^t + h_{pi} r_i^t)(1 - r_i^t)}{z_p^t}, \quad (3)$$

$$r_i^{t+1} = \frac{(r_i^t + h_{ri} p_i^t)(1 - p_i^t)}{z_r^t}, \quad i \in \overline{1, m}.$$

where parameters $h_{pi}, h_{ri} \geq 0$ are interpreted as help (reinforcement, influence) for opponents A, and B, respectively, in the region Ω_i .

We prove that for dynamical conflict systems given by equations (3), there exist equilibrium compromise states. That is, the compromise values p, r in regions Ω_i are determined only by the parameters of external influence. We illustrate this fact in Figure 1.

Finally, we note that the obtained results are suitable for application in the theory of formation and dissemination of beliefs and for finding conditions for

establishing consensus between different opinions in the sense of the works [12; 13].

The authors are grateful for the financial support for the project "Mathematical modeling of complex dynamic systems and processes relevant for the security of the state" (№0123U100853).

REFERENCES

- [1] V. Koshmanenko. A theorem on conflict for a pair of stochastic vectors. *Ukrainian Math. J.* 2003. Vol. 55(4). Pp. 671–678.
- [2] V. Koshmanenko. Theorem of conflicts for a pair of probability measures. *Math. Methods of Operations Research.* 2004. Vol. 59(2). Pp. 303–313.
- [3] T. V. Karataieva, and V. D. Koshmanenko. Society, Mathematical Model of a Dynamical System of Conflict. *J. Math. Sci.* 2020. Vol. 247. Pp. 291–313, DOI: 10.1007/s10958-20-04803-3.
- [4] T. V. Karataieva, V. D. Koshmanenko, M. J. Krawczyk, and K. Kulakowski. Mean field model of a game for power. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.* 2019. Vol. 525. Pp. 535–547, DOI: 10.1016/j.physa.2019.03.110.
- [5] T. Karataieva, and V. Koshmanenko. A Model of Conflict Society with External Influence. *Journal of Mathematical Sciences.* 2023. Vol. 272(4). Pp. 244–264, DOI: 10.1007/s10958-023-06414-0.
- [6] T. V. Karataieva, and V. D. Koshmanenko. Equilibrium states of the dynamical conflict system for three players with a parameter of influence of external environment. 2022. Vol. 25(2). Pp. 207–225.
- [7] V. D. Koshmanenko. The formula of conflict dynamics. *Transactions of Institute of Mathematics, the NAS of Ukraine.* 2020. Vol. 17(2). Pp. 113–149.
- [8] V. Koshmanenko. Spectral Theory for Conflict Dynamical Systems. Kyiv : Naukova Dumka, 2016.
- [9] V. D. Koshmanenko, O. R. Satur. Sure Event Problem in Multicomponent Dynamical Systems with Attractive Interaction. *J. Math. Sci.* 2020. Vol. 249. Pp. 629–646, DOI: 10.1007/s10958-020-04962-3.
- [10] O. R. Satur. Limit States of Multicomponent Discrete Dynamical Systems. *J. Math. Sci.* 2021. Vol. 256. Pp. 648–662, DOI: 10.1007/s10958-021-05451-x.
- [11] O. R. Satur. Dependence of the Behaviors of Trajectories of Dynamic Conflict Systems on the Interaction Vector. *J. Math. Sci.* 2023. Vol. 274. Pp. 76–93, DOI: 10.1007/s10958-023-06572-1.
- [12] L. Li, A. Scaglione, A. Swami, Q. Zhao. Consensus, polarization and clustering of opinions in social networks. *J. on Selected Areas in Communications.* 2013. Vol. 31(6). Pp. 1072–1083 DOI: 10.1109/JSAC.2013.130609.
- [13] M. DeGroot. Reaching a consensus. *Journal of the American Statistical Association.* 1974. Vol. 69. pp. 291–293, DOI: 10.1080/01621459.1974.10480137.

Optimal Control of the Position of Moisture Transfer Sources in Porous Media

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.017>

Dmitriy Klyushin

Faculty of Computer Science and Cybernetics,
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
dokmed5@gmail.com

Sergey Lyashko

Faculty of Computer Science and Cybernetics,
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
lyashko.serg@gmail.com

Natalia Lyashko

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics,
The National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
Lyashko@nas.gov.ua

Andrii Tymoshenko

Faculty of Computer Science and Cybernetics,
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
inna-andry@ukr.net

Abstract—The paper proposes an approach for finding the optimal position of sources of known power for the quasi-linear Richards equation in a rectangular area. The Kirchhoff transformation is applied with the introduced scaling of coordinates and powers of submerged sources, which allows formulating a dimensionless problem. The task of this study is to find the position of submerged sources - such that the distribution of moisture at the final moment of time is close to the given values or the given target function.

Keywords— Richards equation; control; optimization; porous media; moisture transfer.

I. INTRODUCTION

The Richards equation in its original nonlinear form is discussed for quite a long time due to its complexity. A review of achievements and problems related to its solution can be seen for example, in M. W. Farthing [1], Y. Zha [2]. In the case of variably saturated flow in inhomogeneous porous media with layers of different properties, H. Suk [3] proposed a numerical solution method that is applied after the Kirchhoff transformation.

Due to the presence of dynamic capillarity in the system, in C. J. Van Duijn [4] proposed an extension of the Richards equation that includes non-equilibrium effects, analysis of water pressure and saturation. The parameters describing the pore structure were obtained by L. J. Cooper [5] using simulation based on three-dimensional computer tomography images for a soil sample.

K. Kumar [6] provides a catalog of effective models that have been confirmed numerical calculations to describe the flow in an unsaturated porous medium containing a crack. Nonlinear solver of the Richards equation with the help of variable substitution, in particular, the introduction of a dummy variable, proposed by S. Bassetto [7].

Several methods of implicit and semi-implicit time discretization were investigated in S. Keita [8] with second-order accuracy, formulas were used extrapolations and approximation by Taylor series for time discretization nonlinear members.

Recently, the Richards equation is usually solved using the help of local methods, for example, the method of finite differences, finite elements, and finite volumes [9] with the application of iterative methods of the Newton type.

Therefore, the study of the Richards equation continues even now, as evidenced above specified scientific results for the last 5 years.

II. TWO-DIMENSIONAL MODELING PROBLEM

A. Equation Describing the Process

Consider the mathematical model of moisture transfer for the soil area $\Omega = \{(x, y) : 0 < x < l_1, 0 < y < l_2\}$, where l_1 and l_2 are the width and depth, respectively, with the initial moisture equal to ω_0 , the fixed moisture at the boundary, and the determined target moisture distribution at the final moment of time $\varphi(x, y)$. We consider the fluid to be incompressible, and the pressure on the system is constant.

The model is represented by the Richards equation with boundary conditions of the first type:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\omega) \frac{\partial H}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\omega) \frac{\partial H}{\partial y} \right] =$$

$$= \sum_{m=1}^M Q_m F(x - x_m, y - y_m)$$

$$(x, y) \in \Omega, t \in (0, T]; \quad (1)$$

$$\omega|_{\partial\Omega} = \omega_0, \quad \omega|_{t=0} = \omega_0. \quad (2)$$

Here ω — humidity, ω_0 — permanent humidity, ψ — pressure height, $H = \psi(\omega) - y$ — hydrodynamic head, $K_x(\omega)$ — water permeability along the axis Ox , $K_y(\omega)$ — water permeability along the axis Oy , $F(x - x_m, y - y_m) \in L_2((0, T) \times \Omega)$ — a function determining the influence on the system of the source

located at the point (x_m, y_m) . The diffusivity function

along the Oy axis is $D_y(\omega) = K_y(\omega) \frac{d\psi}{d\omega} = e^{0.5\omega}$.

The right-hand side of (1) contains a set of sources of known power Q_m , where $0 \leq Q_m \leq Q_{\max}, m = 1, \dots, M$. The problem is considered only for the unsaturated case.

B. Kirchhoff Transformation and Scaling

Let us assume that the water permeability along the axes is presented in the form $K_x(\omega) = k_1 \cdot k(\omega)$, $K_y(\omega) = k_2 \cdot k(\omega)$ where k_1, k_2 , are coefficients of wet conductivity along the axes Ox, Oy and $k(\omega)$ — moisture conductivity. Without limiting in general, let's put $k_1 = k_2$. Suppose that:

$$\frac{1}{D_y(\omega)} \cdot \frac{dK_y(\omega)}{d\omega} = \ell = \text{const},$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{Q^* k_2 \beta_2}{4\pi k_1} \frac{1}{D_y(\omega)} \frac{\partial \Theta}{\partial t} \equiv \frac{k_2 \beta_2^3 Q^*}{4\pi k_1} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau},$$

where $\beta_2 = 0.5\ell$, $\beta_1 = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \beta_2$, $\alpha = \frac{\langle D_y \rangle \beta_2^2}{T}$,

$\xi = \frac{\beta_1}{l_1} x$, $\zeta = \frac{\beta_2}{l_2} y$, $\tau = \alpha t$, $\langle D_y \rangle$ — average

value of $D_y(\omega)$ in the given area.

Let's apply the Kirchhoff transformation:

$$\Theta(\omega) = \frac{4\pi k_1}{Q^* k_2 \beta_2} \int_{\omega_0}^{\omega} D_y(\omega) d\omega, \quad (3)$$

where Q^* is the source power scaling factor.

Let's introduce the appropriate notation for the power of the sources after scaling: $q_j = \frac{Q_j}{Q^*}$,

$\Omega_0 = \{(x, y) : 0 < x < 1, 0 < y < 1\}$ — the scaled area

Ω , $\partial\Omega_0$ — its boundary. Next, we will consider the area $U = [0, 1] \times \Omega_0$. The equation obtained as a result of the transformation will be considered relative to Θ .

Applying the Kirchhoff transformation (3), for the initial and boundary conditions (2), we obtain the equality of the upper and lower limits of integration and

$\frac{4\pi k_1}{Q^* k_2 \beta_2} \int_{\omega_0}^{\omega_0} D_y(\omega) d\omega = 0$. Inside the domain, the

transformed equation (1) has the form:

$$\begin{aligned} L(\Theta) &\equiv \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \zeta^2} + 2 \frac{\partial \Theta}{\partial \zeta} = \\ &= \sum_{m=1}^M q_m \cdot F(\xi - \xi_m, \zeta - \zeta_m) \\ &(\xi, \zeta) \in \Omega_0, \tau \in (0, 1], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Theta|_{\partial\Omega_0} = 0, \Theta|_{\tau=0} = 0. \quad (5)$$

III. OPTIMIZATION PROBLEM

To formulate the optimization problem, consider the averaging of humidity around the points. We denote by $r_m, m = 1, \dots, M$ the coordinates of the centers of the sources having the corresponding powers q_m . We define the target values of humidity $\varphi(1, \xi_s, \zeta_s)$ as an average for the humidity $\Theta(1, \xi, \zeta)$ around the selected points $(\xi_s, \zeta_s) \in \Omega_0, s = 1, \dots, S$. The aim of the study is to find the values of $r_m, m = 1, \dots, M$, that minimize the value of the square of the difference between $\Theta(1, \xi_s, \zeta_s)$ (the solution of the direct problem (4) by the selected coordinates of the location of the sources) and $\varphi(1, \xi_s, \zeta_s)$. Accordingly, the optimal control is a M -dimensional vector of pairs of source coordinates from the set $([0, 1] \times [0, 1])^M$. We will consider the objective function in the form:

$$J(\bar{\xi}, \bar{\zeta}) = \int_U \left(\Theta(1, \xi, \zeta) - \varphi(1, \xi, \zeta) \right)^2 dU \quad (6)$$

where $\bar{\xi} = (\xi_1, \dots, \xi_M)^T$, $\bar{\zeta} = (\zeta_1, \dots, \zeta_M)^T$ — vectors of source coordinates, with the help of which control is carried out. Therefore, the optimal choice of power sources is reduced to the minimization of the functional

$$J(\bar{\xi}^*, \bar{\zeta}^*) = \min_{\bar{\xi}, \bar{\zeta} \in [0, 1]^M} J(\bar{\xi}, \bar{\zeta}). \quad (7)$$

IV. MATHEMATICAL MODELING

A. Numerical Representation

After the Kirchhoff transformation to linearize the operator, we divide it into time intervals and introduce a grid with a uniform step in spatial coordinates.

To choose the step of division by time and spatial coordinates, we use the condition of stability of the explicit scheme in the form of $\tilde{\tau} \leq \frac{h^2}{2}$. Calculations

were performed with the step $h = \frac{1}{20}$ partitioning by

space and $\tilde{\tau} = 10^{-4}$ for partitioning the time interval.

Next, we denote the values Θ^n, φ^n as averaged over the spatial region around the grid node at the moment of time $\tilde{\tau} \cdot n$.

Next step is replacing the derivatives in space and time with their differential approximation (we present an explicit scheme). Based on the known current approximation of the location of each source $(\xi_m, \zeta_m) \in \Omega_0, m = 1, \dots, M$, find the distribution of

moisture $\Theta_{i,j}^n = \Theta\left(\frac{i}{20}, \frac{j}{20}, n \cdot 10^{-4}\right)$, $i, j = 0, \dots, 20$,

at each time step $n = 1, \dots, N$, based on the known distribution of moisture on the boundaries and at the initial moment of time:

$$\frac{\Theta_{ik}^{n+1} - \Theta_{ik}^n}{\bar{\tau}} = \frac{\Theta_{i+1k}^n - 2\Theta_{ik}^n + \Theta_{i-1k}^n}{h^2} + \frac{\Theta_{ik+1}^n - 2\Theta_{ik}^n + \Theta_{ik-1}^n}{h^2} - 2\frac{\Theta_{ik+1}^n - \Theta_{ik-1}^n}{2h} + \sum_{m=1}^M F(\xi_i, \zeta_k) \cdot q_m; \Theta_{ik}^0 = 0.$$

B. Idea used for optimization

Find maximal value locations of desired function.

a) Perform analysis, where extremums are located and divide the area into sub-areas with 1 maximal value on each.

b) Set a source into every maximum's location from highest power to lowest till all sources are placed.

2) Adding extra limitations and testing.

a) *Sub-area selection*: Perform a simulation with 1 source of lowest power. All locations, where target function has much lower values than humidity at source position are excluded from search.

b) *Initial testing*: Set all sources into points with maximal values of target function to get humidity simulation results. Also perform testing with symmetric placement of 2 or several sources around the maximal value point.

c) *Further testing*: Change position of 1 source by 1 horizontal, vertical or diagonal position compared to previous tests. Compare results with achieved previously using quality functional. Then change position of another source, replacement of which along same direction did not lead to worse result in the past. Finish testing when required accuracy is achieved, or all directions of movement for sources make result worse.

C. Simulation results

For simplicity of explanation, we will demonstrate the performance of the idea for two sources with equal power using the proposed method. To simulate moistening with the help of sources, we introduce the function corresponding to the source located at the point (0.5, 0.5):

$$F(\xi, \zeta) = \begin{cases} 750 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{100} - (\xi - 0.5)^2 - (\zeta - 0.5)^2}}{2\pi}, & \sqrt{(\xi - 0.5)^2 + (\zeta - 0.5)^2} \leq 0.1, \\ 0 \text{ else;} \end{cases}$$

It is easy to check that this function is bounded and belongs to the space $L_2(U)$, and is also continuous. To locate sources with other coordinates, we will use a substitution with a shifted argument. Desired function is chosen as:

$$\varphi^n = \varphi(1, \xi, \zeta) = \begin{cases} 0.5 \cdot \frac{\sqrt{\frac{4}{100} - (\xi - 0.5)^2 - (\zeta - 0.5)^2}}{2\pi}, & \sqrt{(\xi - 0.5)^2 + (\zeta - 0.5)^2} \leq 0.2, \\ 0 \text{ else;} \end{cases}$$

Let's calculate humidity distribution for the case of one source with power 0.5 and determine the maximum value obtained in the grid nodes. Then add one source with same power and test different source positions to find an acceptable solution. Desired function differs from possible results, so we will search for average modular difference of values between Θ^n reached and φ^n .

TABLE I. HUMIDITY DISTRIBUTION AND POSITION TESTING

Source location	Average on all $ \Theta^n - \varphi^n $	Average on central part $ \Theta^n - \varphi^n $
(0.45, 0.45), (0.55, 0.55)	0.01117	0.02456
(0.45, 0.45), (0.55, 0.50)	0.01111	0.02434
(0.45, 0.5), (0.55, 0.5)	0.01105	0.02411
(0.45, 0.5), (0.5, 0.5)	0.01098	0.02376
(0.4, 0.5), (0.5, 0.5)	0.01117	0.02434
(0.45, 0.5), (0.6, 0.5)	0.01124	0.02492
(0.4, 0.5), (0.6, 0.5)	0.01142	0.02545

According to results, solution (0.45, 0.5), (0.5, 0.5) represents the highest found accuracy and testing finished much faster than in case of checking all possible positions. The desired function has different geometry compared to modeling results.

The difference between projections on Oy axis for desired and achieved humidity distribution is significant, still the proposed idea worked good enough and optimal source position was found. As the desired function has symmetry, the solution is not unique but effective.

REFERENCES

- [1] M. W. Farthing, and F. L. Ogden, "Numerical solution of Richards' equation: A review of advances and challenges," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 81, 2017, pp. 1257–1269. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.02.0058>.
- [2] Y. Zha, J. Yang, J. Zeng, C.-H. M. Tso, W. Zeng, and L. Shi, "Review of numerical solution of Richardson-Richards equation for variably saturated flow in soils," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 6 (5), 2019. <https://doi.org/10.1002/wat2.1364>.
- [3] H. Suk, and 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>
- [4] C. J. Van Duijn, K. Mitra, and I. S. Pop, "Travelling wave solutions for the Richards equation incorporating non-equilibrium effects in the capillarity pressure," *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, vol. 41, 2018, pp. 232–268. <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2017.10.015>
- [5] L. J. Cooper, K. R. Daly, P. D. Hallett, M. Naveed, N. Koebnick, A. G. Bengough, T. Roose, "Fluid flow in porous media using image-based modelling to parametrize Richards' equation," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 473 (2207), 2017. <https://doi.org/10.1098/rspa.2017.0178>
- [6] K. Kumar, F. List, I. Pop, and F. Radu, "Formal upscaling and numerical validation of fractured flow models for Richards equation," *J. Comput. Phys*, vol. 407, 2019.
- [7] S. Bassetto, C. Cances, G. Enchery, and 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.
- [8] 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>
- [9] 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, 2022, pp. 358–371. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00468-9>.

Richards-Klute Equation on Graphs

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.018>

Valerii Kolesnykov

Department of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
valera.kolesnikov.1997@gmail.com

Abstract—This paper contains the formulation of the problem of mass transfer in a porous medium on a graph, on the edges of which the one-dimensional problem of mass transfer is modeled using the Richards-Klute equation. To combine separate Richards-Klute equations into a single system, auxiliary mass balance equations are introduced for the vertices of the graph. Problems of approximation of these equations at the vertices of the graph are also discussed.

Keywords—mathematical modeling; Richards-Klute equation; numerical methods; graphs.

I. INTRODUCTION

The Richards-Clute equation describes the process of mass transfer in a porous medium due to capillarity and gravity. It is widespread in the field of agriculture. It is also used for calculations for the construction of irrigation and drainage systems. The Richards-Klute equation is a quasilinear degenerate elliptic-parabolic partial differential equation. Because of this, very few analytical solutions of this equation are known, and the most common tool for solving the Richards-Klute equation is numerical methods [1]. However, due to the properties of the equation, mentioned before, numerical methods for its solution require a large number of calculations to achieve the required approximation accuracy.

Modifications of standard methods of finite elements [2], finite volumes [3], and finite difference methods [4] are used to increase the efficiency of calculations. Also, papers [5] propose linearization of the Richards-Klute equation. An overview of modern techniques for constructing numerical methods can be found in works [1; 5].

II. PROBLEM FORMULATION

The Richards-Klute equation is an equation of the form

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla h) + \frac{\partial K}{\partial z} + s, \quad (1)$$

where t is time [s], θ is a water content [-], h is a pressure head [m], K is the hydraulic conductivity [m/s] and s is the source term [s⁻¹]. z is the vertical coordinate, $(x, y, z, t) \in \Omega \times [0, T]$. Form (1) is also known as mixed form of the Richards-Klute equation. Choosing h as primal variable, (1) can be transformed to h - (or head) form

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla h) + \frac{\partial K}{\partial z} + s, \quad (2)$$

where $C = \partial \theta / \partial h$ is the soil moisture capacity [m⁻¹].

Let's consider the three-dimensional Richards-Klute equation, the area Ω of which will be a system of pipes filled with a porous substance (for example, different types of soil). To model the process of mass transfer of a useful substance through such a system of pipes, one can approximate a three-dimensional equation and use numerical methods from works [1-5]. However, to reduce the number of calculations and increase the efficiency of the modeling process, it is advisable to consider some simplification of the system. Let the diameters of the pipes be negligibly small compared to their lengths. In addition, we will assume that the direction and magnitude of the substance flow at a specific point in any pipe does not depend on the position of the point in the cross section of this pipe.

Then, instead of a three-dimensional region Ω , we can consider some graph $G = (V, E)$, the edges $e \in E$ of which will correspond to the pipes in the initial system, and the vertices $v \in V$ will be the connections of these pipes (Fig. 1). Then for each e we have a one-dimensional Richards-Klute equation

$$C_e \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(K_e \left(\frac{\partial h}{\partial x} + g_z \right) \right), x \in [0, L_e], \quad (3)$$

where C_e and K_e are the characteristics of the porous medium in the pipe corresponding to the edge e , g_z is the gravity impact and its value depends on the direction of the pipe in the gravity field, L_e is length of the pipe. In order to combine the equations on the edges into a single system, we introduce additional binding conditions for the vertices of the graph G . First, we must ensure the continuity of the pressure head h over the entire graph. Then for each vertex we have the following equalities.

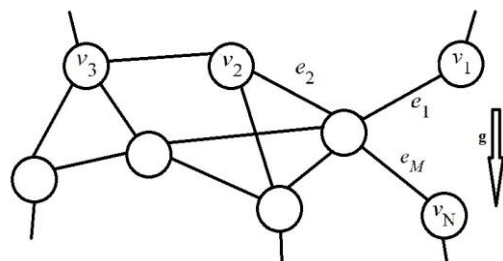


Figure 1. System of pipes presented as graph (g – gravity vector)

$$h(v) = h_e(\delta_e), e \in Adj(v), \quad (4)$$

where $\delta_e = 0$ or L_e depending on which end of e is adjacent to v .

Also, for each vertex, the mass balance condition must be fulfilled, which in terms of the Richards-Klute equation has the following form.

$$\frac{\partial \theta(v)}{\partial t} = \sum_{e \in Adj(v)} q_e(\delta_e), \quad (5)$$

where q_e is a positive flux through the boundary δ_e of the edge e .

Adding initial conditions for edges and boundary conditions for some vertices to (3-5), we obtain a system of equations for modeling the mass transfer process on the graph G .

III. NUMERICAL APPROXIMATION

Since the parameters of the medium on different edges of the graph may differ, it is necessary to provide a rule for the discretization of the mass balance equation (5) for further application of numerical methods. This equation is similar to the condition at the boundary between different layers of the non-homogeneous medium for the one-dimensional Richards-Klute equation. Since equation (4) allows us to identify the vertex node and the end nodes of the edges adjacent to this vertex during discretization, we have the following mass balance equation.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{m_0} C_i^{N_i-1} \frac{h_v^{j+1} - h_v^j}{\Delta t} \\ & + \sum_{i=1}^{m_N} C_i^2 \frac{h_v^{j+1} - h_v^j}{\Delta t} \\ & = \sum_{i=1}^{m_0} \frac{1}{\Delta x_i} K_i^{N_i-1} \left(\frac{h_{i,N_i-1}^{j+1} - h_v^{j+1}}{\Delta x_i} + g_{i,z} \right) \\ & - \sum_{i=1}^{m_N} \frac{1}{\Delta x_i} K_i^2 \left(\frac{h_{i,1}^{j+1} - h_v^{j+1}}{\Delta x_i} + g_{i,z} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

where m_0 is number of edges, for which $\delta_e = 0$, m_N is number of edges, for which $\delta_e = L_e$, j is current and $j+1$ is the next time step, Δx_i , $g_{i,z}$, K_i , C_i are the spatial step, gravity impact, hydraulic conductivity and soil moisture capacity for the edge e_i respectively. K_i and C_i are calculated at the corresponding point of edge e_i (see Fig. 2).

Let's consider an example of Richards-Klute equation and its numerical solution obtained using the given discretization. Let graph G looks like on the Fig. 3. For every edge e of G we consider the one-dimensional Richards-Klute equation (3) with the next parameters.

$$\theta(h) = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r)}{\alpha + |h|^\beta} + \theta_r, K(h) = K_s \frac{A}{A + |h|^\gamma}, \quad (7)$$

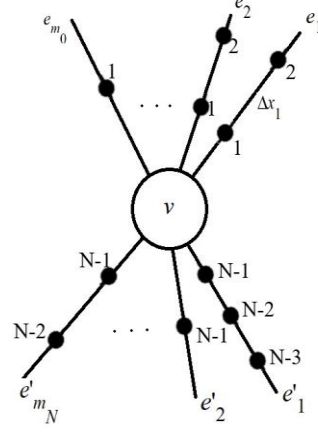


Figure 2. Node v and edges adjacent to it

where $\alpha = 1.611 \times 10^6$, $\theta_r = 0.075$, $\theta_s = 0.287$, $\gamma = 4.74$, $A = 1.175 \times 10^6$, $K_s = 0.00944$, $L = 40$, $g_z = 1$ for every edge, $\beta_1 = 4.96$, $\beta_2 = 2.96$, $\beta_3 = 3.96$. Initial condition is $h = -41.5$ for every edge and vertex. Boundary conditions on the vertices are $h_1 = -41.5$, $h_2 = -20.7$, $h_3 = -20.7$. Parameters of discretization are $\Delta t = 1$, $\Delta z = 0.8$ for all edges. Fig. 4 contains graphs of approximate solution at the time $T = 200$.

Due to the different parameters of the media in the edges, the substance spread much faster through edge e_3 and began to spread up edge e_2 through the vertex v_4 . Note that the matrix of the system of linear algebraic equations, which is formed to find an approximate solution in the next step, is not tridiagonal in this case. However, in the general case, the matrix is symmetric, sparse, and has the property of diagonal dominance. It allows the use of effective numerical methods and increases the efficiency of the calculation process compared to the standard three-dimensional approximation of the Richards-Klute equation.

IV. CONCLUSIONS

A mass transfer process in porous media on graphs model was built using the Richards-Klute equation. This model serves as a replacement for the three-dimensional classical Richards-Klute equation to increase the efficiency of an approximate solution finding process. Mass balance equations and their numerical approximation for graph vertices were discussed. Numerical experiments were carried out.

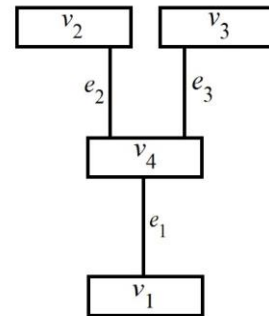


Figure 3. Graph for Richards-Klute equation (3), (7)

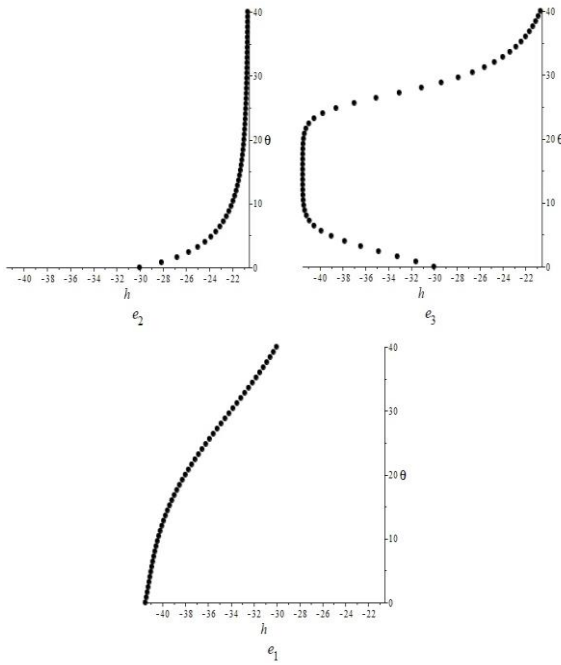


Figure 4. Solution of Richards-Klute equation on graph

REFERENCES

- [1] Y. Zha, J. Yang, J. Zeng, C.-H. M. Tso, W. Zeng, and L. Shi. Review of numerical solution of Richardson-Richards equation for variably saturated flow in soils. *WIREs Water*. 2019. Vol. 6 (5). URL: <https://doi.org/10.1002/wat2.1364>.
- [2] G. J. Machado, R. M. S. Pereira, S. Clain, N. Araújo, and S. O. Lopes. A new stabilized scheme for a Richards' equation with evapotranspiration. *Groundwater for Sustainable Development*. 2022. Vol. 17, 100736. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100736>.
- [3] S. Dey, and A. Dhar. Generalized mass-conservative finite volume framework for unified saturated-unsaturated subsurface flow. *Journal of Hydrology*. 2022. Vol. 605, 127309. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127309>.
- [4] H. A. Pedrozo, M. R. Rozenberger, and C. E. Shevzov. Stability analysis of the solution of the one-dimensional Richards' equation by the finite difference method. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1738 (1). 480008. doi:10.1063/1.4952244.
- [5] M. W. Farthing, and F. L. Ogden. Numerical Solution of Richards' Equation: A Review of Advances and Challenges. *Soil Science Society of America Journal*. 2017. Vol. 81 (6). Pp. 1257–1269. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.02.0058>.

Is Cronbach's alpha relevant indicator for quality of educational measurements?

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.019>

Volodymyr Kovtunets

Institute of Higher Education of National Academy of Education Science
Kyiv, Ukraine
vkovtunets@ukr.net

Nadiia Polishchuk

Kyiv National I. K. Karpenko-Karyi Theatre, Cinema and Television University
Kyiv, Ukraine
n.polishchuk2000@ukr.net

Abstract—Mathematical model of criteria learning outcomes assessment shows that well known Cronbach's alpha may not be appropriate indicator of assessment of professional qualifications. This indicator is good for area of learning outcomes having only one main factor. Professional standards include a list of professional functions some of them form the main factor in a sense of factor analysis.

Keywords—assessment; learning outcomes; professional qualifications; Cronbach's alpha; validity; reliability.

- validity;
- reliability;
- fairness [4].

[1] suggests some method for evaluating validity of assessment.

Cronbach's alpha is developed to evaluate reliability of assessment. Parallel tests approach is the origin of this indicator as well as for other approach to evaluate reliability of the test.

Let us consider geometrical model of assessment by testing process.

Having some test X with n test items and N persons who passed the test we consider vectors $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, $i=1, 2, \dots, n$, where x_{ij} denotes score of j -th person gotten at i -th item.

As it follows from the definitions

$$r(x_i, x_j) = \cos(x_i - \bar{x}_i, x_j - \bar{x}_j), \quad (1)$$

where $r(x_i, x_j)$ means Pearson correlation between test scores of i -th and j -th test item. Positive correlation means that the angle between two vectors x_i and x_j in some N -dimensional Euclidean space is less than 90° .

Cronbach's alpha may be calculated by formula

$$\alpha = \frac{n}{n-1} \left(1 - 2 \frac{\sum_{i,j=1, i \neq j}^n r(x_i, x_j)}{\sigma^2(X)} \right), \quad (2)$$

where $\sigma^2(X)$ is a dispersion of the test X (see [4], [5]).

Therefore one may make a conclusion that alpha corresponds to level of closeness of test items near some common (average) direction (factor).

It's known that L. Cronbach early considered also such interpretation of alpha [4].

It's easy to show that having data for evaluation of content validity [1] one may get value of alpha. But mentioned data doesn't confirm test validity. Some additional research is needed to confirm test validity. For sure parallel test techniques also may be used.

So Cronbach's alpha does not guarantee content validity of the test. It guarantees only closeness of test items to some direction (factor) which may not be strongly identified.

Therefore statements on quality of test based on Cronbach's alpha value in general aren't right.

I. INTRODUCTION

In [1] it was published mathematical model of content validity of criteria assessment. But well known Cronbach's alpha usually is used to evaluate a reliability of testing (assessment) and apply it as evaluation of the assessment quality. In many cases it may be right, for example if MOODLE recommends to evaluate a quality of formative assessment in testing form (it recommends not use test with alpha less than 0.70) because in teaching process assessment usually assesses instructing of narrow set of learning outcomes. Factor analysis of such assessments really shows one main factor.

But in case of more wide content set it is not true. For example, a content set of practical psychologist in social work professional standard [2] includes learning outcomes (knowledge and skills) concerning behind psychology also law, social work, communication etc. It implies that set main factors includes at least three elements.

Multisubject test for school graduates used in Ukraine in 2019–2023 shall have at least two main factors linked to language and mathematics [3].

Authors also observed case with negative alpha in 2011 when ability test was piloting for university students selection. Nevertheless this test added to subject test score increased predictive validity of the score for selection of students.

In this paper we'll explain borders of successful using Cronbach's alpha and suggest modernized model of assessment content validity.

II. MAIN RESULTS

American Psychological Association (APA) recommends three criteria of assessment quality:

For example test assessing learning outcomes of psychologist in social work qualification seekers usually has two principal factors. Of course Cronbach's alpha is at least less than 0.7.

The same situation we observed while studying assessment of learning outcome of high school graduates. Formally one may tell these tests assess some common construct – school graduates achievement and there are reasons to apply Cronbach's alpha as relevant indicator for the test quality. But factor analysis discovers that test has at least two principal factors linked to languages and mathematics [6] and it implies decreasing of Cronbach's alpha.

All mentioned above doesn't mean denial of Cronbach's alpha. It is recognized indicator of test reliability. And its good at least in psychological tests.

But reliability is useful only in the case when test is contently valid. That is Cronbach's alpha shouldn't be applied as universal indicator of test quality. Especially it concerns assessment of professional qualifications.

The question is what may be a strategy for evaluation of test quality. Let omit fairness, it should be study by some sociological methods. Let consider validity and reliability.

With regard to mentioned above factor analysis should be performed at the first stage. This discovers number of dimensions of space of results. It allows to consider space of all test items (see [1]) as a compact set in Euclidean space and apply Euclidean metrics instead one suggested in [1].

If parallel tests items were added to the test its validity may be evaluated.

In case of one-dimensional space where single principal factor corresponds to content for assessment Cronbach's alpha is perfect indicator of test quality.

In case of more dimensions small value of Cronbach's alpha isn't indicator of bad test. If professional standard anticipates essentially different working functions alpha may be close to zero or even negative.

Different approach may be applied to evaluate test reliability. The simplest one anticipates dividing test on two or more parts and evaluation of reliability of each.

The most fruitful method is based on studying of predictive validity. This method if combined with mentioned above may submit reasons for improvement of professional standards.

III. CONCLUSIONS

Quality of assessment of learning outcomes includes three indicators. Reliability defined by Cronbach's alpha is one of them. Test validity is also important indicator. Cronbach's alpha far from 1 does not mean that test is of low quality. Only complex study including validity and reliability gives right conclusion. Model of test validity study is applicable to study validity and reliability. Factor analysis is powerful method to ensure right complex study of both indicators.

REFERENCES

- [1] V. Kovtunets. Mathematical Model of Criterion Assessment. *Proceedings of III International scientific and practical conference Modeling, Control and Information Technologies*. 2019. P. 145–149.
- [2] Practical psychologist (social work). Professional standard. [Online]. URL: <https://register.nqa.gov.ua/profstandart/prakticnij-psiholog-socialna-sfera>. (Accessed: August 11, 2023). (in Ukrainian).
- [3] Ukrainian Center of Education Quality Assessment (UCEQA). [Online]. URL: <https://testportal.gov.ua/en/>. (Accessed: August 11, 2023).
- [4] Standards for Educational and Psychological Testing. [Online]. URL: https://kupdf.net/queue/aera-apa-amp-ncme-2014-standars-for-educational-and-psychological-testing_5a68c4f8e2b6f5341181b776_pdf?queue_id=-1&x=1630046340&z=MzcuNTcuMC4yMTQ. (Accessed: August 11, 2023).
- [5] E. Cho, and S. Chun. Fixing a broken clock: A historical review of the originators of reliability coefficients including Cronbach's alpha. *Survey Research*. 2018. Vol. 19(2). Pp. 23–54.
- [6] Ковальчук Ю. О. Теорія освітніх вимірювань. Ніжин: ПП Лисенко М.М., 2012. 200 с.

Modeling of nonlinear clarification of aqueous suspensions at rapid filters

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.020>

Poliakov V.

Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
vpoliakov.ihm@gmail.com

Abstract—The basic mathematical problem of nonlinear deep bed clarification of aqueous suspensions at rapid filters is formulated. The results of its solution using exact method for the linear form of the adhesion function and approximate method for the nonlinear form are selectively presented. The derived dependencies are illustrated by parallel exact and approximate calculations of the main filtration characteristics. An estimation of the calculated errors due to simplification of the original model was carried out indicating the high accuracy of the approximate solution.

Keywords—filtration; suspension; nonlinear problem; solution; dependence; method.

I. INTRODUCTION

The technological cycle of water purification in accordance with modern standards, as a rule, includes the removal of suspended (filtration) and dissolved (biofiltration) impurities using rapid filters as the most important stage. Thanks to their combination, it is possible to obtain high-quality drinking water enriched with bioadditives. Mass transfer between liquid, solid and biological phases plays a key role in a complex of processes of a physical, chemical and biological nature. It is the stable transfer from the liquid phase to the other two phases that ensures water purification directly and thus the productive operation of the filters. This report focuses on the filtration of aqueous suspensions, which is accompanied by the formation and accumulation of a specific deposit. It is in the deposit that hazardous dispersed impurities are fixed. However, such deposit is often not passive, but actively participates in the absorption of suspended matter. Due to this fact, the formal description of the kinetics of interphase mass transfer is significantly complicated. In general, the kinetic equation is represented in the following form [1; 2]

$$\frac{\partial S}{\partial t} = f_{\alpha}(S)C - f_{\beta}(S), \quad (1)$$

where C, S are the (volumetric) concentrations of suspended and deposited suspension particles; f_{α} and f_{β} characterize the absorption (adhesion) of suspended and deposited impurity particles. If the deposit is inert with respect to the suspended matter or averaging of the function $f_{\alpha}(S)$ is allowed and, in addition, proportionality to S is accepted for f_{β} , then linear filtration takes place. Analytical methods are effective

for studying it. A number of exact solutions to linear filtration problems have been obtained [3]. However, as extensive filtration practice shows, linear filtration models often do not provide an adequate pattern. And the main reason for the discrepancy between real and theoretical results is the significant dependence of the rate coefficient of adhesion of dispersed impurities to the packed bed grains on the value S . From a physical point of view, the close connection of f_{α} with S is due mainly to the limited absorption resource of the filtering material and the autocatalytic effect [4–6]. The specified factors in the case of the presentation

$$f_{\alpha}(S) = \alpha_0 \chi(S) \quad (2)$$

are taken into account separately or jointly as a first approximation by taking the following expressions for $\chi(S)$

$$\chi_1(S) = S_m - S, \quad (3)$$

$$\chi_2(S) = 1 + \theta S, \quad (4)$$

$$\chi_3(S) = (S_m - S)(1 + \theta S), \quad (5)$$

where S_m is the dirt-holding capacity relative to the impurity, θ is the autocatalytic coefficient. More complex approximation expressions for $\chi(S)$ allow us to achieve a slightly better agreement between the actual and theoretical results. However, calculations must be performed exclusively by numerical methods. It is realistic to develop engineering methods for calculating nonlinear filtration only based on (3)-(5) and some other representations of a special type.

It was with the aim of creating a theoretical basis for applied calculations of deep bed filtration of a suspension with the active participation of newly formed deposit that its systematic studies were carried out using analytical methods. As a result, it was possible to obtain, firstly, exact solutions to the corresponding nonlinear mathematical problems with a linear function form $\chi(S)$ and a constant filtration rate. Secondly, an approximate solution was found and tested, which, in addition to (3) – (5), also covers a number of other more complex representations for $\chi(S)$.

II. STATEMENT AND SOLUTION OF MATHEMATICAL PROBLEMS

The results of filtration studies at $\chi(S)$ according to (2) in the case of an initially contaminated packed bed are presented in [7; 8]. Therefore selective data are provided lower regarding the other two representations. The initial mathematical model includes two connected compartments - clarification and hydrodynamic. The second compartment is not considered here. The first compartment, along with (1), also includes the equation of vertical mass transfer, which can be written after a series of carefully justified simplifications in this way

$$\frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0. \quad (6)$$

The coordinate axis is directed in the direction of movement of the suspension. The system of equations is supplemented with standard boundary and initial conditions

$$z = 0, C = C_0 = const; \quad t = 0, S = S^0 = const. \quad (7)$$

An exact solution to the problem (1), (6), (7) for $\chi(S)$ in accordance with (4) was obtained using a number of replacements of the independent and dependent variables, namely,

$$U = \exp(\bar{\alpha}_0 \bar{z} + \bar{\beta} \bar{t} - \bar{\alpha}_0 \Phi), \quad \Phi = \frac{1}{\bar{\alpha}_0} (\bar{\alpha}_0 \bar{z} + \bar{\beta} \bar{t} - \ln U).$$

Here and below $\bar{z} = z/L, \bar{t} = Vt/(n_0 L), \bar{\alpha}_0 = L\alpha_0/V, \bar{\theta} = n_0 C_0 \theta, L$ is the height of the grain layer, V is the filtration rate, n_0 is the porosity of the clean bed. As a result, for example, for the relative output concentration of suspended matter \bar{C}_e , the expression was derived

$$\bar{C}_e(\bar{t}) = \frac{I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_0 \bar{\beta} \bar{t}}) - (\bar{\alpha}_0 \bar{\theta} - \bar{\beta}) G_2(\bar{z}, \bar{t})}{I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_0 \bar{\beta} \bar{z} \bar{t}}) - (\bar{\alpha}_0 \bar{\theta} - \bar{\beta}) G_2(\bar{z}, \bar{t}) + \bar{\alpha}_0 G_1(\bar{z}, \bar{t})} \quad (8)$$

where

$$G_1(\bar{z}, \bar{t}) = \int_0^{\bar{z}} e^{\bar{\alpha}_0 \bar{S}_m (1 - \bar{S}^0) \xi} I_0(2\sqrt{\bar{\beta} \bar{\alpha}_0 \bar{S}_m \bar{t} (\bar{z} - \xi)}) d\xi,$$

$$G_2(\bar{z}, \bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} e^{-(\bar{\alpha}_0 \bar{\theta} - \bar{\beta})(\bar{t} - \xi)} I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_0 \bar{\beta} \bar{z} \xi}) d\xi,$$

I_0 is the symbol of the Bessel function of the imaginary argument of the first kind of zero order.

To illustrate this solution, the \bar{C}_e concentration was determined using formula (8) with the following typical initial data: $\bar{\alpha}_0 = 5, \bar{\beta} = 0.01$. The curves of the growth of the specified concentration over time, calculated using the software package Mathcad, are shown in Fig. 1. It clearly demonstrates the significance of the coefficient $\bar{\theta}$ for long-term clarification of the suspension. The calculated curves corresponding to $\bar{\theta} > 0$, noticeably deviate downward from the base

curve for comparison, curve 1 ($\bar{\theta} = 0$), starting approximately from the moment $\bar{t} = 70$.

If the adhesion function is nonlinear, then exact methods are ineffective. Then it is possible to derive calculated dependencies only using approximate methods. In this case, estimation of their accuracy becomes of great importance. It is within the framework of this topic that special simplification techniques have been developed that take into account the specific features of the behavior of the filtration characteristics and do not allow any linearization of the original nonlinear model. The essence of these techniques is the dynamic averaging of the concentration C in the kinetic equation (1).

After a series of calculations of varying complexity, the approximate solution was obtained in parametric form, where the parameter is the value \bar{C}_a , specially introduced during the solution of the problem. Thus, to carry out specific calculations, it is necessary to involve two dependencies connecting \bar{C} and \bar{t} with \bar{C}_a . It was received

$$\bar{C}(\bar{C}_a, \bar{t}) = \frac{C}{C_0} = e^{-\mu(\bar{C}_a, \bar{t})} \times$$

$$\times \left[1 + \bar{\beta} \bar{t} \int_1^{\bar{C}_a} \frac{\bar{S}(\zeta, \bar{t})}{[\bar{S}^0 - \sigma_1(\zeta)] (1 - e^{-(\bar{\alpha}_0 \zeta + \bar{\beta}) \bar{t}})} e^{\mu(\zeta, \bar{t})} d\zeta \right] \quad (9)$$

$$\bar{z} = \bar{t} \int_1^{\bar{C}_a} \frac{d\zeta}{[\bar{S}^0 - \sigma(\zeta)] (1 - e^{-(\bar{\alpha}_0 \zeta + \bar{\beta}) \bar{t}})}, \quad (10)$$

where $\mu(\bar{C}_a, \bar{t}) = \bar{\alpha}_0 T \int_{\bar{C}_a}^1 \frac{\bar{S}_m - \bar{S}(\zeta, \bar{t})}{\bar{S}^0 - \sigma(\zeta)} \frac{d\zeta}{1 - e^{-(\bar{\alpha}_0 \zeta + \bar{\beta}) \bar{t}}}$,
 $\sigma(\bar{C}_a) = \bar{\alpha}_0 \bar{S}_m \bar{C}_a / (\bar{\alpha}_0 \bar{C}_a + \bar{\beta})$.

III. DISCUSSION OF APPROXIMATE RESULTS

Approximate calculations were performed for two series of examples. The first series was intended precisely to evaluate the accuracy of the \bar{C} calculations and, in general, the approximate solution. Its high accuracy is evidenced by fig. 2. Calculations were carried out approximately according to (9), (10) and exactly using the corresponding formula from [7]. The following characteristic values of model coefficients were used as initial data: $\bar{\beta} = 0.005, \bar{S}_m = 5000, \bar{\alpha}_0 = 0.001, 0.0015$. Calculation errors were significantly larger at $\bar{\alpha}_0 = 0.0015$ reaching a maximum value of 9.5%. However, with continued filtration ($\bar{t} > 500$) they noticeably decreased. If the absorptive capacity of the bed was one and a half times weaker, then the maximum error did not exceed 2% and both calculated curves (1, 2) almost merged during the calculation period.

Also, the subject of approximate calculations was the concentration profiles of the deposited particles and the increase in head losses over time for linear (3), (4) and nonlinear (5) forms of $\chi(S)$. In conclusion, the

reaction of technological times (protective action, achievement of maximum permissible head losses and filter run duration) to hypothetical changes in the absorption capacity of the filter material and deposit was analyzed using exact and approximate dependencies. In general, the results of a detailed quantitative analysis demonstrated the high capabilities and reliability of the new method for calculating nonlinear filtration of aqueous suspensions.

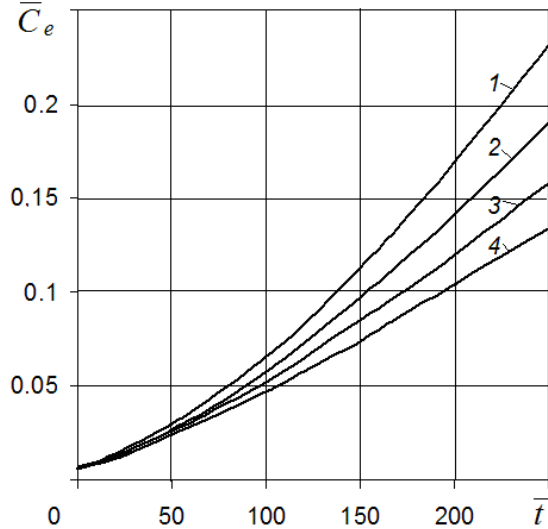


Figure 1. Increase in the relative concentration of suspended matter in the filtrate:

1 – $\bar{\theta} = 0$; 2 – $\bar{\theta} = 0.0005$;
3 – $\bar{\theta} = 0.001$; 4 – $\bar{\theta} = 0.0015$

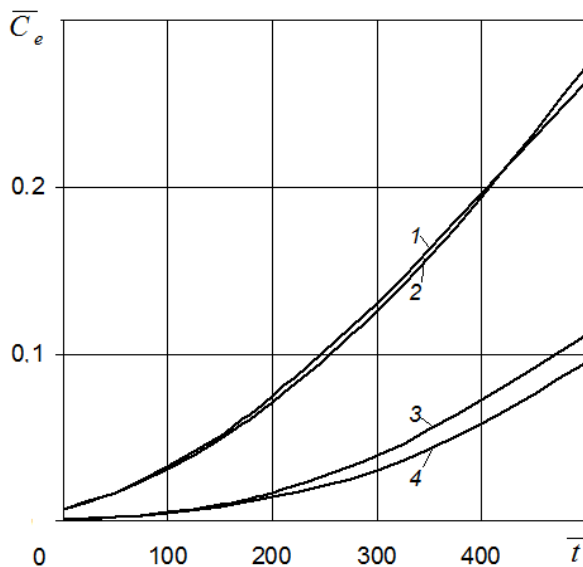


Figure 2. Increase in the relative concentration of suspended matter in the filtrate over time:

1,3 – approximate calculation; 2,4 – accurate;
1,2 – $\bar{\alpha}_0 = 0.001$; 3,4 – $\bar{\alpha}_0 = 0.0015$

REFERENCES

- [1] P. A. Grabovskiy, G. M. Larkina, and V. I. Progulniy. Backwashing of purification filters. Odessa : Optimum, 2012.
- [2] O. Ya. Oliynik, and Yu. I. Kalugin. Some results of theoretical studies of mass exchange processes in porous media. *Problems of water supply, water supply and hydraulics*. 2005. Vol. 5. Pp. 100–112.
- [3] V. L. Polyakov. Engineering calculation of filtering a suspension through a two-layer load with linear mass transfer

kinetics. *Chemistry and Water Technology*. 2011. Vol. 33(4). Pp. 367–388.

- [4] M. Elimelech, and C. R. O'Melia. Kinetics of deposition of colloidal particle in porous media. *Environ. Sci. Technol.* 1990. Vol. 24. Pp. 1528–1536.
- [5] E. D. Skouras, V. N. Burganos, C. A. Paraskeva, and A. C. Payatakes. Phenomenological description and network simulation of horizontal filtration dynamics. *Sep. Purif. Technol.* 2011. Vol. 80. Pp. 105–118.
- [6] S. Vigneswaran, and J. S. Chang. Mathematical modeling of the entire cycle of deep bed filtration. *Water Air Soil Pollut.* 1986. Vol. 29. Pp. 155–164.
- [7] V. L. Poliakov. Filtration of suspensions through a multilayer bed with nonlinear mass transfer kinetics. 1. *Theory, Chemistry and Water Technology*. 2011. Vol. 33(1). Pp. 3–14.
- [8] V. L. Poliakov. Filtration of suspensions through a multilayer bed with nonlinear mass transfer kinetics. 2. *Quantitative analysis. Chemistry and Water Technology*. 2011. Vol. 33(2). Pp. 111–127.
- [9] D. M. Mints, V. Z. Meltser. Hydraulic resistance of grain porous medium during colmatage. *Reports of Academy of Sciences of USSR*. 1970. Vol. 192(2). Pp. 304–306.

On Stationary Probabilities of State-Dependent Markov Retrial Queue

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.021>

Oksana Pryshchepa

Department of Computer Science and Applied Mathematics
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
o.v.pryshchepa@nuwm.edu.ua

Abstract—In this paper, we consider the Markov model of a multiserver retrial queue with an input flow rate that depends on the number of calls in an orbit and with a limited number of retrials. We have obtained the conditions for the existence of the stationary regime and presented formulas for steady-state probabilities. Our approach is based on the approximation of the input model by the model with truncated state space.

Keywords—retrial queue; steady-state probabilities; service process.

I. INTRODUCTION

Retrial queues are a special class of stochastic models that take into account the features of the service process [1]. If the input call finds all servers busy, it becomes a source of repeated calls. The calls can try to get service an infinite number of times. However, it is possible that the number of repeated attempts can be limited. It might be if calls are impatient or resources are limited.

These models are widely used for the modelling of computer and telecommunication systems, call centres and control systems in airports. From a practical point of view, systems with variable input flow are very important and have to be tackled. The input flow rate in these systems depends on the number of repeated calls in the current moment of time [2]. This allows control of the input flow for maximizing the quality of service and maximizing the income from the system.

In this paper, we consider retrial queues with a controlled input flow rate and with a limited number of retrials. We have built explicit formulas of stationary probabilities using the truncated system.

II. MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM WITH A LIMITED NUMBER OF RETRIALS

Consider an $(m+1)$ -dimensional Markov chain $Q^m(t) = (Q_0(t), Q_1(t), \dots, Q_m(t))$, $t \geq 0$ in the phase space $S = \{0, 1, \dots, c\} \times Z_+^m$, where $Z_+ = \{0, 1, \dots\}$. $Q^m(t)$ is defined by its infinitesimal characteristics $q_{\beta\beta'}$, $\beta = (i, j_1, \dots, j_k, \dots, j_m)$, $\beta' = (i', j_1', \dots, j_k', \dots, j_m') \in S$:

- 1) if $i = 0, 1, \dots, c-1$, $j_k \in Z_+$, $k = 1, 2, \dots, m$, then

$$q_{\beta\beta'} = \begin{cases} \lambda_{j_1, \dots, j_k, \dots, j_m}, \beta' = (i+1, j_1, \dots, j_k, \dots, j_m), \\ i\mu, \beta' = (i-1, j_1, \dots, j_k, \dots, j_m), \\ j_1\nu_1, \beta' = (i+1, j_1-1, \dots, j_k, \dots, j_m), \\ j_2\nu_2, \beta' = (i+1, j_1, j_2-1, \dots, j_k, \dots, j_m), \\ \dots \\ j_k\nu_k, \beta' = (i+1, j_1, \dots, j_k-1, \dots, j_m), \\ \dots \\ j_m\nu_m, \beta' = (i+1, j_1, \dots, j_k, \dots, j_m-1), \\ - \left(\lambda_{j_1, \dots, j_k, \dots, j_m} + i\mu + \sum_{k=1}^m j_k\nu_k \right), \\ \beta' = (i, j_1, \dots, j_k, \dots, j_m), \\ 0, \text{ otherwise,} \end{cases}$$

- 2) if $i = c$, $j_k \in Z_+$, $k = 1, 2, \dots, m$, then

$$q_{\beta\beta'} = \begin{cases} \lambda_{j_1, \dots, j_k, \dots, j_m}, \beta' = (c, j_1+1, \dots, j_k, \dots, j_m), \\ c\mu, \beta' = (c-1, j_1, \dots, j_k, \dots, j_m), \\ j_1\nu_1, \beta' = (c, j_1-1, j_2+1, \dots, j_m), \\ j_2\nu_2, \beta' = (c, j_1, j_2-1, j_3+1, \dots, j_m), \\ \dots \\ j_k\nu_k, \beta' = (c, j_1, \dots, j_k-1, j_{k+1}+1, \dots, j_m), \\ \dots \\ j_{m-1}\nu_{m-1}, \\ \beta' = (c, j_1, \dots, j_k, \dots, j_{m-1}-1, j_m+1), \\ j_m\nu_m, \beta' = (c, j_1, \dots, j_k, \dots, j_m-1), \\ - \left(\lambda_{j_1, \dots, j_k, \dots, j_m} + c\mu + \sum_{k=1}^m j_k\nu_k \right), \\ \beta' = (c, j_1, \dots, j_k, \dots, j_m), \\ 0, \text{ otherwise.} \end{cases}$$

The component $Q_0(t)$ is the number of busy servers at the time $t \geq 0$ and $Q_k(t)$, $k=1, \dots, m$ is the number of retrial calls that have made k unsuccessful attempts to

get a service. In the retrial queue, the number of retrials is limited by m .

Markov chain $Q^m(t)$ models the service process in the following state-dependent retrial queue. System consists of c identical servers. From outside calls arrive for service. If there is at least one free server on the call arrival, it immediately gets service and then leaves the system. Service time is a exponentially distributed random variable with parameter μ . If all the servers are busy then the call creates a source of repeated calls and tries to get service in a random period. Each call is allowed to make m repeated attempts. If there are no free servers at the time of the last repeated attempt, the call abandons the system and does not get service.

The system is given by the following parameters: $\lambda_{j_1 \dots j_k \dots j_m}$ is the input flow rate, $j_k \in \mathbb{Z}_+$, $k=1, 2, \dots, m$; μ is the service rate; ν_k is k -th retrial rate, $k=1, 2, \dots, m$. Ergodicity conditions for the process $Q^m(t)$ are presented by the following lemma.

Lemma 1. If $\overline{\lim}_{j_m \rightarrow \infty} j_m^{-1} \lambda_{j_1 \dots j_k \dots j_m} < \nu_m$ and $\lambda_{j_1 \dots j_k \dots j_m}, \mu, \nu_k > 0, j_k \in \mathbb{Z}_+, k=1, 2, \dots, m$, then $Q^m(t)$ is ergodic and its ergodic distribution $\pi_{i_{j_1 \dots j_k \dots j_m}}, (i, j_1, \dots, j_m) \in S$.

In order to obtain a representation of $\pi_{i_{j_1 \dots j_k \dots j_m}}, (i, j_1, \dots, j_m) \in S$ in terms of system parameters, we use approximation with truncated system technique. This system has a fixed number of N places in each set of retrials. This means that the call leaves the system after k -th attempt to get service if all servers are busy and there are N calls that have made k attempts already. The service process for $m \geq 2$ becomes complicated and explicit formulas of the stationary probabilities have not been found so far. However, for $m=1$ we give a representation of $\pi_{i_{j_1 \dots j_k \dots j_m}}, (i, j_1, \dots, j_m) \in S$ in terms of system parameters in an explicit form.

III. STATIONARY PROBABILITIES

Theorem 1. Let for the one-channel state-dependent retrial queue with one retrial the conditions of Lemma 1 hold. Then, for the service process $Q^1(t) = (Q_0(t), Q_1(t))$, a stationary regime exists and stationary probabilities take the form:

$$\pi_{0j} = \frac{1}{j! \nu_1^j} \prod_{i=1}^j \frac{\lambda_{i-1} (\lambda_{i-1} + (i-1) \nu_1)}{\lambda_i + i \nu_1 + \mu} \pi_{00}, \varphi=1, 2, \square,$$

$$\pi_{1j} = \frac{\lambda_0}{\mu} \frac{1}{j! \nu_1^j} \prod_{i=1}^j \frac{\lambda_{i-1} (\lambda_i + i \nu_1)}{\lambda_i + i \nu_1 + \mu} \pi_{00}, \varphi=0, 1, \square,$$

where

$$\pi_{00}^{-1} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{j! \nu_1^j} \prod_{i=1}^j \frac{\lambda_{i-1} (\lambda_{i-1} + (i-1) \nu_1)}{\lambda_i + i \nu_1 + \mu},$$

$$+ \frac{\lambda_0}{\mu} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{j! \nu_1^j} \prod_{i=1}^j \frac{\lambda_{i-1} (\lambda_i + i \nu_1)}{\lambda_i + i \nu_1 + \mu}.$$

Let us introduce $x_j = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_{j+n}}{\beta_{j+n}}$ be the continued fraction where for $j=1, 2, \dots$

$$\alpha_j = - \frac{\lambda_{j-1} ((\lambda_{j-1} + (j-1) \nu_1)^2 + (j-1) \nu_1 \mu)}{j(j+1) \nu_1^2 \mu},$$

$$\beta_j = - \frac{j \nu_1 ((\lambda_j + \mu + j \nu_1)^2 + \mu (\lambda_{j-1} + \mu + j \nu_1))}{j(j+1) \nu_1^2 \mu}.$$

Theorem 2. Let for the two-channel state-dependent retrial queue with one retrial the conditions of Lemma 1 hold. Then, for the service process, a stationary regime exists and stationary probabilities take the form:

$$\pi_{0j} = \pi_{00} \prod_{k=0}^{j-1} x_k, \quad j=1, 2, \dots,$$

$$\pi_{1j} = \frac{(\lambda_j + j \nu_1) \pi_{00}}{\mu} \prod_{k=0}^{j-1} x_k, \quad j=0, 1, \dots,$$

$$\pi_{2j} = \frac{1}{2\mu^2} ((\lambda_j + j \nu_1)^2 + j \nu_1 \mu - (j+1) \nu_1 \mu x_j) \times$$

$$\times \pi_{00} \prod_{k=0}^{j-1} x_k, \quad \varphi=0, 1, \square,$$

where

$$\pi_{00}^{-1} = \frac{1}{2\mu^2} \times$$

$$\times \left(\sum_{j=0}^{\infty} ((\lambda_j + \mu + j \nu)^2 + \mu(\mu + j \nu - (j+1) \nu x_j)) \prod_{k=0}^{j-1} x_k \right).$$

The obtained results can be used to solve optimization problems in the class of threshold strategies [3].

CONCLUSION

In this paper, we have presented state-dependent retrial queues with a limited number of repeated attempts and variable input flow that depends on the current number of repeated calls. For this type of system, we have found ergodicity conditions and obtained explicit representations of steady-state probabilities. These results allow us to analyse the service process, compute the characteristics of the systems and solve optimization problems.

REFERENCES

- [1] G. I. Falin, J.G.C. Templeton. Retrial Queues. London : Chapman and Hall, 1997.
- [2] O. V. Pryshchepa, E. O. Lebedev. On a Multi-Channel Retrial Queueing System. Cybernetics and Systems Analysis. 2017. Vol. 53(3). Pp. 441–449.
- [3] O. Pryshchepa, O. Kardash, A. Yakymchuk, M. Shvec, K. Pavlov et al. Optimization of multi-channel queuing systems with a single retail attempt: Economic approach. *Decision Science Letters*. 2020. Vol. 9(4). Pp. 559–564.

Spatial analysis of carbon dioxide emission processes from cement production and iron and steel production in Ukraine

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.022>

Zoriana Romanchuk

International Institute for Applied Systems Analysis,
Laxenburg, Austria
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Sofiia Hladun

Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine

Orysia Yashchun

International Institute for Applied Systems Analysis
Laxenburg, Austria
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Oleksandr Kiselov

Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine

Rostyslav Bun

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
WSB University, Dąbrowa Górnicza, Poland

Sofiia Kharyton

Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine

Abstract—Carbon dioxide is the most significant greenhouse gas with the longest lifespan in the atmosphere. Nowadays it is extremely important to work on finding strategies to reduce carbon dioxide emissions. Due to this, we need to develop advanced monitoring methods that will help us to make better decisions and track both positive and negative trends in carbon dioxide emissions. This study is devoted to spatial analysis of emission processes from cement, iron and steel production in Ukraine.

Keywords—mathematical modeling; carbon dioxide emission; cement production; iron and steel production.

I. INTRODUCTION

Ukraine is a participant of two the most famous international treaties aimed at controlling and reducing greenhouse gas emissions: the Kyoto Protocol and the Paris Agreement. According to these agreements, the country estimates GHG emissions in each sector every year. The disadvantage of this approach is the lack of spatial reference of the obtained results, which makes it impossible to understand the GHG emissions dynamics by regions and complicates the development of localized methods of GHG emissions reduction.

The aim of this study is to perform a spatial and temporal estimation of carbon dioxide emissions from industrial processes in two developed sectors of Ukraine: Cement production and Iron and Steel production (categories 2A1 and 2C1 according to IPCC Guidelines).

II. INPUT DATA COLLECTING AND PREPROCESSING

Our first step was to determine locations of cement and metallurgical plants. After that, analyzing various available sources of information such as official websites, plants reports and media, we collected data on

the product capacity of the enterprises, which were used as disaggregating factor/proxy for statistical data on manufactured industrial products. In addition, we paid a lot of attention to information about occupied plants and based on it we made our own estimates about the volume of products produced by each plant.

Since, carbon dioxide in cement production sector emits only during calcination of carbonate materials, we used information from open sources to determine plants that actually produce clinker and statistical data on country level about clinker production that were provided by the State Statistics Service of Ukraine [1]. The statistical data were disaggregated in proportion to the previously collected production capacity of the plants that produce clinker.

In Iron and Steel production sector, we estimated carbon dioxide emissions from iron, steel and sinter production. Many plants in this sector published accurate amount of manufactured products. For those who did not, we disaggregated the difference between statistical data and known production volumes proportionally to production capacity.

Carbon dioxide emissions from clinker production depend on calcium oxide and magnesium oxide content from carbonate source in clinker. Ukraine publish average CaO and MgO content from carbonate source in clinker for each year since 1990 in National Inventory Submission [2]. These data were used for emission factors calculation for different years for Cement production sector.

Carbon dioxide emission factors in Iron and Steel production sector depend on type of equipment used in the plant. We managed to collect information about furnace type for most plants. For those with unknown equipment type we used Global Average Factor published in [3].

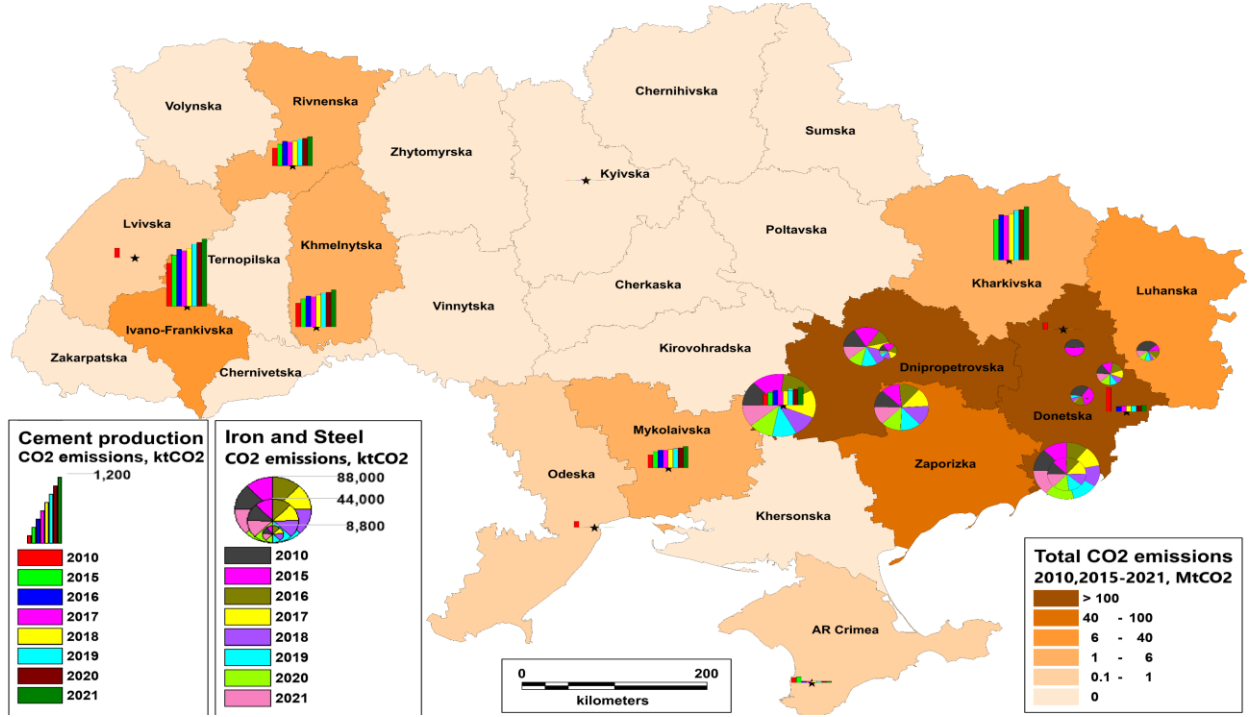


Figure 1. Spatial and temporal distribution of carbon dioxide emissions

III. MATHEMATICAL MODELS

For carbon dioxide emissions estimation for each plant in each study year in Cement production sector we built the following model:

$$E_i^{CO_2} = M_i^{cl} \times EF^{cl} \times CF^{ckd},$$

where $E_i^{CO_2}$ is the annual carbon dioxide emissions produced by i -th cement plant; M_i^{cl} is the mass of clinker produced by i -th cement plant; EF^{cl} is the annual emission factor for clinker based on average CaO and MgO content; and CF^{ckd} is the emission correction factor for cement kiln dust, equals to 1.02.

Carbon dioxide emissions in Iron and Steel production sector for each plant in each year were estimated using the next model:

$$E_i^{CO_2} = M_i^{stl} \times EF_i^{stl} + M_i^{irn} \times CF^{irn} \times EF^{stl} + M_i^{sint} \times EF^{sint},$$

where $E_i^{CO_2}$ is the annual carbon dioxide emissions produced by i -th metal plant; M_i^{stl} is the mass of steel produced by i -th metal plant; EF_i^{stl} is the emission factor for i -th steel plant based on furnace type; M_i^{irn} is the mass of iron produced by i -th metal plant; CF^{irn} is the percentage of iron that were not processed into steel, equals to 10%; EF^{irn} is the emission factor for iron that was taken from [3]; M_i^{sint} is the mass of iron produced by i -th metal plant; EF^{sint} is the emission factor for sinter that was taken from [3].

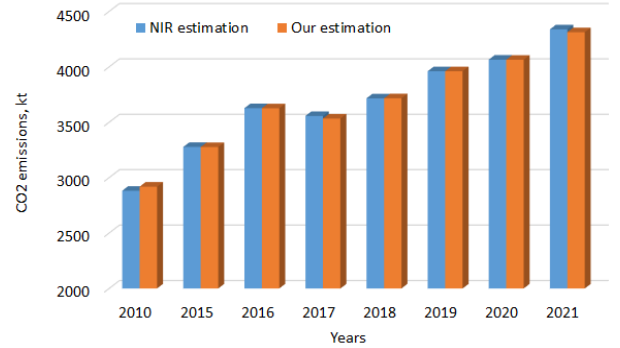


Figure 2. Comparison of National Inventory Report data and our estimations

IV. RESULTS

Based on our estimations we produced a dataset that gives a comprehensive understanding of emission dynamic of carbon dioxide over a time in different regions of Ukraine. Fig. 1 shows spatial and temporal distribution of calculated emissions. Comparison of our results and National Inventory Submissions data in Cement production sector is shown in Fig. 2.

Retrieved dataset can be useful for building and monitoring region-level strategies for sustainable development, air quality analysis, climate change modeling and many other purposes. The data also reflect economic and political changing in a country. Fig. 3 shows carbon dioxide emissions trend over a time for occupied after 2014 territories and territories controlled by Ukraine.

Modeling, control and information technologies – 2023

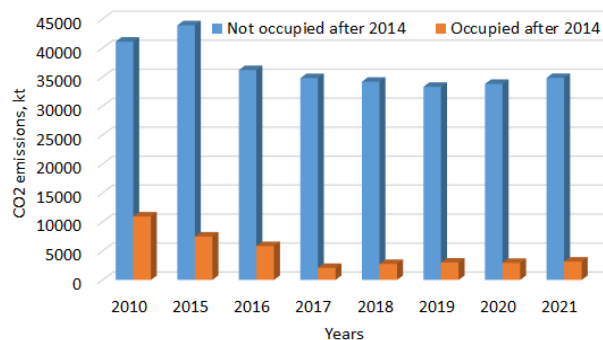


Figure 3. Comparison of emissions from occupied and not occupied after 2014 territories

REFERENCES

- [1] The State Statistics Service of Ukraine. [Online]. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>. (Accessed: October 16, 2023).
- [2] National Inventory Submissions 2023. [Online]. URL: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2023>. (Accessed: October 16, 2023).
- [3] Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. *Industrial Processes and Product Use*. Japan : Institute for Global Environmental Strategies, 2006. Vol. 3.
- [4] R. Bun, N. Charkovska, O. Danylo, P. Topylko, M. Halushchak and Z. Nahorski. Spatial modeling of greenhouse gas emissions from stationary sources. Lviv : PP Soroka T.B., 2016.

Improving the Efficiency of the MPU-6050 Sensor Module for Inertial Drone Navigation

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.023>

Elkhan Sabziev

Laboratory of modeling and control of continuous processes
Institute of Control Systems
Baku, Azerbaijan
elkhan.sabziev@gmail.com

Tahir Alizada

Laboratory of methods of recognition and intelligent analysis of signals
Institute of Control Systems
Baku, Azerbaijan
tahiralizada1973@gmail.com

Namig Heydarov

Innovative research group
Institute of Radiation Problems
Baku, Azerbaijan
nmq.heydarov91@gmail.com

Abstract—We investigate the problems of noise reduction in navigation data supplied by an accelerometer and a gyroscope. The MPU-6050 sensor module, which is often a component of drone navigation systems, was used in the experiments. To smooth the data, the use of "simple averaging method" and "moving average method" is recommended. We show experimentally that the data smoothing methods reduce the errors by more than 10 times. It is also shown that the "simple averaging method" can reduce the hardware load by more than 10 times compared to other data processing methods.

Keywords—navigation; drone; unmanned aerial vehicle; MPU-6050; inertial sensor; accelerometer; gyroscope; noise.

I. INTRODUCTION

As a rule, global navigation satellite systems (GNSS) such as GPS (USA), GLONASS (Russia), BeiDou (China), Galileo (Europe) and DORIS (France) are used to determine the location of drones [1], [2], [3]. All five systems are available with the use of dedicated navigation or geodetic receivers anywhere on the Earth's surface. In addition to global navigation systems, there are regional systems: IRNSS (India) and QZSS (Japan). These satellite navigation systems can be used only in India and Japan, respectively.

Despite the seemingly universal accessibility of satellite navigation, in certain conditions its use can be unreliable and sometimes impossible. One such condition is the use of drones (kamikaze drones, reconnaissance drones, etc.) in armed conflict areas. Satellite navigation signals in such areas are jammed by special radio electronic systems. Thus, there is a need to develop alternative navigation systems.

Among alternative navigation systems with respect to radio electronic (including satellite) systems, inertial navigation is considered to be the most effective [3], [4], [5], [6]. In recent years, many miniaturized, relatively cheap and quite accurate inertial sensors (accelerometers and gyroscopes) have appeared on the world market. It is especially convenient to use them as

part of a single module, such as MPU-6000 or MPU-6050 (Fig. 1) [7].



Figure 1. MPU-6050 sensor module [8]

II. PROBLEM STATEMENT

In this paper, we aim to improve the efficiency of the MPU-6050 sensor module by selecting the optimal sampling frequency F of inertial sensors for collecting navigation data and the amount of navigation data N taken for averaging (in order to reduce the noise interference). Preliminary studies have shown that both parameters have an impact on the system and its result. For instance, an overestimation of the F parameter leads to a strain on the computational resources of the system, while an underestimation reduces the accuracy of the computed navigation data due to the influence of noise. An overestimation of the parameter N in turn also overloads the CPU of the system, while an underestimation increases the influence of noise.

Thus, in order to find the optimal values of the parameters F and N , appropriate computational experiments should be carried out. For this purpose, we built a hardware unit with the MPU-6050 module and the ability to connect to a computer via USB 2.0 Type A connector. Special software was also developed to control this hardware unit and record data from the

inertial sensors (accelerometer and gyroscope) of the MPU-6050 module.

III. FINDING THE OPTIMAL VALUE OF THE PARAMETEER F

As mentioned above, the parameter F is the sampling frequency of the inertial sensors (accelerometer and gyroscope) to collect navigation data. As can be seen from the graphical interface (Fig. 2) of the hardware unit control program, for the computational experiment, the user is prompted to select the sensor sampling frequency within the range of 1 Hz to 10 Hz.

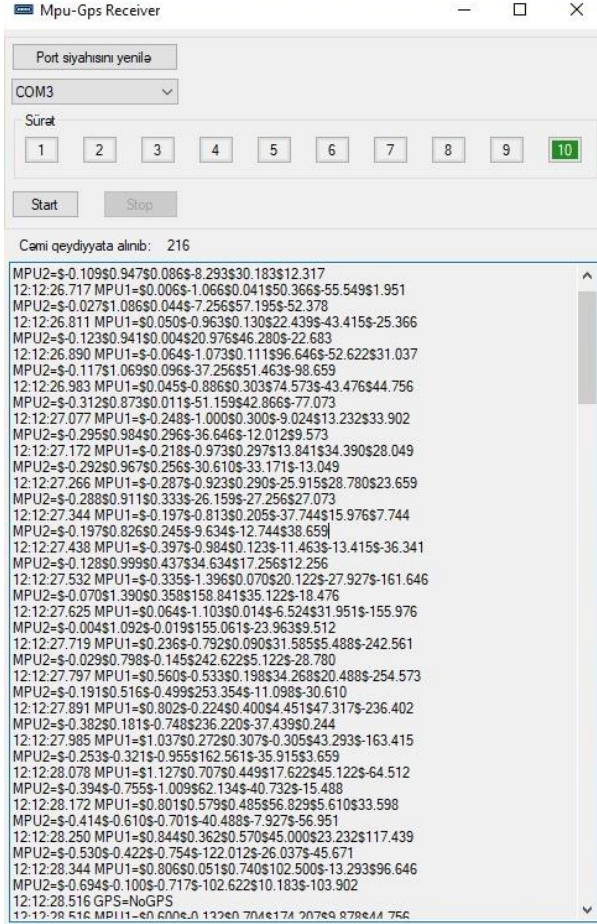


Figure 2. Graphical interface of the control program of the hardware unit equipped with the MPU-6050 sensor module

The computational experiment has shown that the accuracy of the end results, i.e., the averaged inertial data, increases with the increase of the sensor sampling frequency. The computational resources of the hardware unit here are quite sufficient for the maximum value of the sampling frequency (10 Hz). Thus, the sensor sampling frequency of 10 Hz of the MPU-6050 module is recommended as the most effective one available for use in inertial navigation of a drone in real conditions. Furthermore, for further improvement of the inertial navigation system, it is recommended to modify the hardware unit (containing the MPU-6050 sensor module) and the control program to increase the sampling frequency to the highest possible for the MPU-6050 module. In this way, the range of sensor sampling frequencies will be increased, opening up new possibilities for computational experiments.

IV. FINDING THE OPTIMAL VALUE OF THE PARAMETEER N

As mentioned earlier, the parameter N is the amount of navigation data taken for averaging (in order to reduce the noise interference). For this purpose, we propose to use two well-known smoothing methods - "simple averaging method" and "moving average method".

A. Simple averaging method

This method consists in the following. The MPU-6050 sensor module reads a certain amount N of inertial data, which are then averaged (summed and divided by their amount N):

$$A_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{(j-1)N+i},$$

$$G_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_{(j-1)N+i}.$$

Here,

$A_{(j-1)N+i}$ is accelerometer data,

A_j is averaged accelerometer data,

$G_{(j-1)N+i}$ is gyroscope data,

G_j is averaged gyroscope data,

j is the sequence number of the averaging segment including N of sensor data,

N is the amount of sensor data in each averaging segment.

As a result of the application of the method, one result is calculated for each observation segment consisting of N inertial sensor data. For instance, with N equal to 10, the total number of averaged values A_j will be 10 times less than all accelerometer values.

B. Moving average method

Smoothing by the "moving average method" is performed according to the following algorithm:

$$A_j = \frac{1}{N+1} \sum_{i=j-N/2}^{j+N/2} A_i,$$

$$G_j = \frac{1}{N+1} \sum_{i=j-N/2}^{j+N/2} G_i.$$

Here,

A_i is accelerometer data,

A_j is averaged accelerometer data ($\frac{N}{2} < j < i_{max} - \frac{N}{2}$),

G_i is gyroscope data,

G_j is averaged gyroscope data ($\frac{N}{2} < j < i_{max} - \frac{N}{2}$),

j is the sequence number of the averaging segment including N of sensor data,

N is the amount of sensor data in each averaging segment (N should be only even number).

Unlike the previous method, in this moving average method the amount of averaged data is practically the same as the number of measurements. Thus, we have a continuous supply of averaged inertial data, which makes it possible to maintain increased navigation efficiency compared to the application of the "simple averaging method". This is an advantage of the "moving average method". The disadvantage is the increased load on the computational component of the navigation system due to the processing of a large amount of averaged data.

V. RESULTS OF COMPUTATIONAL EXPERIMENTS

In this section, the results of the computational experiments are outlined and analyzed. For the experiments, we have built a hardware unit (Fig. 3) containing the MPU-6050 sensor module inside and a GPS module that can connect to an external GPS antenna. The GPS in the hardware unit is designed to be used during intensive movement and was not used in this experiment.



Figure 3. Hardware unit containing the MPU-6050 sensor module

The software program described in Section III (Fig. 2) was developed to control the hardware unit.

In this paper, we present the results of a 20 s long observation of a stationary MPU-6050 sensor module. During the observation, the module was sampled at a frequency of 10 Hz. Thus, 200 pieces of navigation data for each component (x, y, z) from accelerometer and each component (x, z) from gyroscope that make up the MPU-6050 module were recorded. The control program (Fig. 2) generated MS Excel spreadsheets with the recorded navigation data of the MPU-6050 sensor module.

TABLE I. RESULTS OF THE COMPUTATIONAL EXPERIMENT WITHOUT THE APPLICATION OF SMOOTHING METHODS ($F=10$ Hz)

Data type	Data processing results		
	Average value	Variance, 10^{-6}	Relative error, 10^{-3}
Ax	-0.006	12.394	2.747
Ay	-0.991	11.504	2.687
Az	-0.032	26.482	4.178
Gx	-0.036	7411.86	68.460
Gz	-1.180	6154.46	61.673

TABLE II. RESULTS OF THE COMPUTATIONAL EXPERIMENT WITH THE APPLICATION OF THE SIMPLE AVERAGING METHOD ($F=10$ Hz, $N=10$)

Data type	Data processing results		
	Average value	Variance, 10^{-6}	Relative error, 10^{-3}
Ax	-0.006	0.833	0.209
Ay	-0.991	0.804	0.201
Az	-0.032	2.434	0.414
Gx	-0.036	611.863	5.334
Gz	-1.180	554.463	5.112

TABLE III. RESULTS OF THE COMPUTATIONAL EXPERIMENT WITH THE APPLICATION OF THE MOVING AVERAGE METHOD ($F=10$ Hz, $N=10$)

Data type	Data processing results		
	Average value	Variance, 10^{-6}	Relative error, 10^{-3}
Ax	-0.006	0.830	0.201
Ay	-0.991	0.801	0.199
Az	-0.032	2.429	0.411
Gx	-0.036	611.859	5.329
Gz	-1.180	554.448	5.101

The conducted experiments have confirmed the conclusions of our previous studies about the significant noise contamination in navigation data supplied by the accelerometer and gyroscope of the MPU-6050 sensor module.

As can be seen from the tables, the average value of navigation data does not change, which is to be expected based on the averaging mechanism. At the same time, the variance and the average relative error were reduced by more than 10 times after smoothing. This confirms the effectiveness of the applied smoothing methods at $F=10$ Hz and $N=10$ points in each averaging segment. Thus, the application of the above methods will make it possible to significantly reduce the noise in the navigation data obtained from the MPU-6050 sensor module and thus improve drone navigation.

VI. CONCLUSION

Analysis of the results of the computational experiments yields the following conclusions:

- Navigation data are extremely noisy. Therefore, it is necessary to apply one of the smoothing methods.
- The "simple averaging method" and the "moving average method" give satisfactory results for smoothing navigation data. The errors are reduced by 10 times and more.
- The "simple averaging method" requires much less computational resources and is therefore recommended for drone navigation as more efficient than the "moving average method".
- A maximum frequency of 10 Hz is recommended as the most effective sensor sampling frequency available for the MPU-6050 module (1 Hz to 10 Hz). We assume that the optimal frequency will be higher than 10 Hz. To find it, a modification of the hardware unit and control program is recommended with the possibility of increasing the sampling frequency of the MPU-6050 module sensors to at least 100 Hz.

REFERENCES

- [1] C. Rhodes. Global Navigation Satellite Systems. Murphy & Moore Publishing, 2022.
- [2] B. Bhatta. Global Navigation Satellite Systems: New Technologies and Applications. CRC Press, 2nd edition, 2023.
- [3] M. S. Grewal, A. P. Andrews, and C. G. Bartone. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. Wiley, 4th edition, 2020.
- [4] D.A.A. Cicci. A Short Course in Inertial Navigation and Missile Guidance (Short Courses in Aerospace Engineering). Independently published, 2022.
- [5] M. Braasch. Fundamentals of Inertial Navigation Systems and Aiding. Scitech Publishing, 2023.
- [6] C. Jekeli. Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications. 2nd edition, Walter de Gruyter, 2023.
- [7] Sensors Modules MPU-6050 Gyroscope Accelerometer. [Online]. URL: <https://www.electronicwings.com/sensors-modules/mpu6050-gyroscope-accelerometer-temperature-sensor-module>. (Accessed: October 15, 2023).
- [8] MPU-6050 Module. [Online]. URL: http://wiki.sunfounder.cc/index.php?title=MPU6050_Module. (Accessed: October 15, 2023).

Minimizing the time for UAV to reach a moving target

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.024>

Elkhan N.Sabziev
Institute of Control System,
National Defense University
Baku, Azerbaijan
elkhan.sabziev@gmail.com

Lamiya N.Nabadova
Institute of Control System
Baku, Azerbaijan
nabadovalamiya@gmail.com

Abstract—In this study, we address the control challenges of directing a flying object, specifically a drone, to a designated target, utilizing coordinates relayed from a monitoring device. Monitoring device delivers information about coordinates of suspicious object to drone. Upon receiving signals from a monitoring device about potential threats on the ground, the drone is tasked to promptly respond, identify, and neutralize the suspicious object. This article deals with the issue of controlling the process of flying snow to the target in the shortest possible time.

Keywords—drone applications; optimal control; UAV controlling; path planning; navigation: UAV mission planning

I. INTRODUCTION

In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs), commonly referred to as drones, have gained substantial attention in various sectors including defense, logistics, agriculture, entertainment, and surveillance. One of the principal challenges in the operation of drones is the achievement of optimal control, ensuring they reach their desired destinations swiftly and efficiently. Time is often a critical factor, especially in applications like emergency deliveries or quick response missions. Efficient flight not only ensures timely completion of a task but also aids in energy conservation, maximizing the operational period of the drone on a single charge.

In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs), commonly referred to as drones, have gained substantial attention in various sectors including defense, logistics, agriculture, entertainment, and surveillance [1, 2]. This research proposes algorithm to control the drone when it must reach the target during shortest time to complete any task. In this case, it is considered that if monitoring system detects suspicious object on the ground of the border zone and delivers information about location of the object to drone, drone should get the intended target and annihilate it. For this situation drone should reach the detected object as fast as possible. So, it must be controlled optimally taking into account its physical limitations. Using the suggested model, we compute the drone's control function values to ensure it reaches the identified target in the shortest possible time and accomplishes the mission.

II. PROBLEM STATEMENT

This scientific paper is related to solving controlling process of flying drone to reach target in the shortest period of time. During arial surveillance the monitoring device the area detects a suspicious object moving in a certain direction at a certain speed. The geographical scale of the issue is such that the area can be considered a flat part. The monitoring device can determine the trajectory of the object. It is considered that this object is identified and determined that it should be neutralized. The other aircraft provided with neutralization device is informed to fly to the suspicious object and annihilate it. It is considered that the drone receiving the flight command must reach the suspicious object in the shortest possible time after rising to a certain height. Since the UAV is flying parallel to the ground since the flight altitude does not change, we will make the flight plane the same as the Earth plane.

To describe the mutual position of the UAV and the suspect object, let us introduce a rectangular OXY coordinate system with respect to the ground. Let's mark the time of the reaching process with $t \geq 0$ and the coordinates of the UAV as a function of time with $x(t) = (x_1(t), x_2(t))$. In a simple case, the governing equations of the UAV can be written as follows:

$$\begin{cases} x_1''(t) = u_1(t), \\ x_2''(t) = u_2(t). \end{cases} \quad (1)$$

Here is the $u(t) = (u_1(t), u_2(t))$. control function, which physically represents the ratio (momentum) of the propulsion force generated by the drone's engines to its mass. As a rule, the controllability of the aircraft is limited, which means that there is a known $u_0 > 0$ quantity determined by the power of the UAV engine that,

$$u_1^2(t) + u_2^2(t) \leq u_0 \quad (2)$$

For the sake of simplicity, we can assume that the UAV is located at the origin of coordinates at the moment $t = 0$, and let us denote its speed

$V(0) = (v_{x,1}, v_{x,2})$ at that moment. These conditions can be written as follows:

$$\begin{cases} x_1(0) = 0, \\ x_2(0) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x'_1(0) = v_{x,1}, \\ x'_2(0) = v_{x,2}. \end{cases} \quad (4)$$

As mentioned above, the movement trajectory of the suspicious object is determined by monitoring device. We will consider that the movement of this object has the character of uniform linear motion. If we mark the coordinates of the suspicious object as a function of time, its trajectory can be expressed as follows:

$$\begin{cases} x_{1,n} = a_{x,1} + b_{x,1}t, \\ x_{2,n} = a_{x,2} + b_{x,2}t. \end{cases} \quad (5)$$

Here $a_{x,1}, b_{x,1}, a_{x,2}, b_{x,2}$ coefficients are known quantities. In order to track the detected object, it is necessary to choose control $u(t) = (u_1(t), u_2(t))$ in such a way that regardless of where the aircraft is at the moment of detection, it will change its trajectory and reach the suspicious object and begin to move along with it (parallel) and follow it. This can happen when the speed of the aircraft is greater than the speed of the detected object, i.e.

$$\sqrt{b_{x,1}^2 + b_{x,2}^2} < \sqrt{2}|u(t)| \leq \sqrt{2}u_0$$

Let's mark the moment when the UAV will be controlled and reach the suspicious object with T . As the case may be, the UAV should be managed in such a way that, at the moment T its coordinates and velocity should coincide with the current coordinates and velocity of the suspect object, in other words, the following equations should be satisfied.

$$\begin{cases} x_1(T) = a_{x,1} + b_{x,1}T, \\ x_2(T) = a_{x,2} + b_{x,2}T. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x'_1(T) = b_{x,1}, \\ x'_2(T) = b_{x,2}. \end{cases} \quad (7)$$

It is necessary to find a control $u(t)$ function that satisfies the inequality (2) so that the solution of the system of equations (1) satisfies the conditions (3)–(4), (6)–(7) and T is minimal.

III. PROBLEM SOLUTION

In order to apply the mathematical apparatus of optimal control theory with phase constraints, let us write the system (1) as a system of first order ordinary differential equations. If we substitute $x'_1(t) = x_3(t)$, $x'_2(t) = x_4(t)$, problem (1) – (7) will be as follows:

$$\begin{cases} x'_1(t) = x_3(t), \\ x'_2(t) = x_4(t), \\ x'_3(t) = u_1(t), \\ x'_4(t) = u_2(t). \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_1(0) = 0, \\ x_2(0) = 0, \\ x_3(0) = v_{x,1}, \\ x_4(0) = v_{x,2}. \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_1(T) = a_{x,1} + b_{x,1}T, \\ x_2(T) = a_{x,2} + b_{x,2}T, \\ x_3(T) = b_{x,1}, \\ x_4(T) = b_{x,2}. \end{cases} \quad (10)$$

It is necessary to find such a $u(t)$ control function that ensures the solution of the problem (8) – (10). In previous research [3] it is investigated that, to solve the problem it is sufficient that to change the values of $u_1(t), u_2(t)$ control functions only once at the same time moment $\tau \subseteq (0, T)$. In other words, there is a $\tau \subseteq (0, T)$ point that flying control u changes at the $t = \tau$ moment when bringing flying object from state (8) to state (9).

In $(0, \tau)$ and (τ, T) intervals, let's denote the values of control vectors $(u_{x,1,0}, u_{x,2,0})$ and $(u_{x,1,T}, u_{x,2,T})$ accordingly. From the management theory of extremal problems, it is known that the solution of the optimization problem within the constraint (2) is realized in the case of equality, in other words, for $u_{x,1,0}, u_{x,2,0}, u_{x,1,T}, u_{x,2,T}$ quantities

$$\begin{cases} u_{x,1,0}^2 + u_{x,2,0}^2 = u_0^2, \\ u_{x,1,T}^2 + u_{x,2,T}^2 = u_0^2. \end{cases} \quad (11)$$

We can write the general solution of system (8) as follows:

$$\begin{cases} x_1(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}u_{x,1,0}t^2 + v_{x,1}t, & 0 < t < \tau, \\ \frac{1}{2}u_{x,1,T}t^2 + c_{x,1}t + e_{x,1}, & \tau < t < T, \end{cases} \\ x_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}u_{x,2,0}t^2 + v_{x,2}t, & 0 < t < \tau, \\ \frac{1}{2}u_{x,2,T}t^2 + c_{x,2}t + e_{x,2}, & \tau < t < T \end{cases} \\ x_3(t) = \begin{cases} u_{x,1,0}t + v_{x,1}, & 0 < t < \tau, \\ u_{x,1,T}t + c_{x,1}, & \tau < t < T, \end{cases} \\ x_4(t) = \begin{cases} u_{x,2,0}t + v_{x,2}, & 0 < t < \tau, \\ u_{x,2,T}t + c_{x,2}, & \tau < t < T. \end{cases} \end{cases}$$

Here $c_{x,1}, c_{x,2}, e_{x,1}, e_{x,2}$ are constant quantities. Taking account conditions (10),

$$\begin{cases} \frac{1}{2}u_{x1,T}T^2 + c_{x1}T + e_{x1} = a_{x1} + b_{x1}T, \\ \frac{1}{2}u_{x2,T}T^2 + c_{x2}T + e_{x2} = a_{x2} + b_{x2}T, \\ u_{x1,T}T + c_{x1} = b_{x1}, \\ u_{x2,T}T + c_{x2} = b_{x2}. \end{cases} \quad (12)$$

On the other hand, from continuity condition of (x_1, x_2, x_3, x_4) functions at $t = \tau$ moment:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}u_{x1,T}\tau^2 + c_{x1}\tau + e_{x1} = \frac{1}{2}u_{x1,0}\tau^2 + v_{x1}\tau, \\ \frac{1}{2}u_{x2,T}\tau^2 + c_{x2}\tau + e_{x2} = \frac{1}{2}u_{x2,0}\tau^2 + v_{x2}\tau, \\ u_{x1,0}\tau + v_{x1} = u_{x1,T}\tau + c_{x1}, \\ u_{x2,0}\tau + v_{x2} = u_{x2,T}\tau + c_{x2}. \end{cases} \quad (13)$$

If we eliminate variables from $c_{x1}, c_{x2}, e_{x1}, e_{x2}$ (12), (13) systems, by taking linear combinations of different rows, we get:

$$\begin{cases} u_{x1,T}(\tau^2 - T^2) - u_{x1,0}\tau^2 = 2a_{x1}, \\ u_{x2,T}(\tau^2 - T^2) - u_{x2,0}\tau^2 = 2a_{x2}, \\ u_{x1,T}(T - \tau) + u_{x1,0}\tau = b_{x1} - v_{x1}, \\ u_{x2,T}(T - \tau) + u_{x2,0}\tau = b_{x2} - v_{x2}. \end{cases} \quad (14)$$

Based on (14) system, $u_{x1,0}, u_{x2,0}, u_{x1,T}, u_{x2,T}$ quantities can be expressed depending on τ and T :

$$\begin{cases} u_{x1,0} = \tau^{-1}T^{-1}[2a_{x1} + (T + \tau)(b_{x1} - v_{x1})], \\ u_{x2,0} = \tau^{-1}T^{-1}[2a_{x2} + (T + \tau)(b_{x2} - v_{x2})], \\ u_{x1,T} = -(T - \tau)^{-1}T^{-1}[2a_{x1} + \tau(b_{x1} - v_{x1})], \\ u_{x2,T} = -(T - \tau)^{-1}T^{-1}[2a_{x2} + \tau(b_{x2} - v_{x2})]. \end{cases} \quad (15)$$

If we consider the expressions (15) in (11), considering the variables, the following system of nonlinear algebraic equations of the 4th order is obtained depending on τ and T :

$$\begin{cases} [2a_{x1} + (T + \tau)(b_{x1} - v_{x1})]^2 + \\ + [2a_{x2} + (T + \tau)(b_{x2} - v_{x2})]^2 = \tau^2T^2u_0^2, \\ [2a_{x1} + \tau(b_{x1} - v_{x1})]^2 + \\ + [2a_{x2} + \tau(b_{x2} - v_{x2})]^2 = (T - \tau)^2T^2u_0^2 \end{cases} \quad (16)$$

As can be seen from the system (16), the value of τ and T variables depends only on the initial data of the problem - known $v_{x1}, v_{x2}, a_{x1}, b_{x1}, a_{x2}, b_{x2}$ quantities and $c_{x1}, c_{x2}, e_{x1}, e_{x2}$. Given these quantities, the system of equations (16) can be solved by approximate calculation methods, for example, simple iterations or Newton's method [4; 5].

IV. CONCLUSION

To address the optimal control problem of the UAV aiming to reach its target in the shortest possible time, a numerical algorithm is introduced. This algorithm determines the moments to change control and computes the expected reaching time. Using these derived values, we formulated equations to ascertain the optimal control functions for guiding the UAV efficiently.

REFERENCES

- [1] D. Giordan, Y. Hayakawa, F. Nex, F. Remondino, and P. Tarolli. The use of remotely piloted aircraft systems (RPASs) for natural hazards monitoring and management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 18(4). Pp. 1079–1096.
- [2] Y. Naidoo, R. Stopforth, and G. Bright. Development of an UAV for search & rescue applications. *IEEE Africon'11*. Livingstone, Zambia, 2011. Pp. 1–6.
- [3] Nabadova L. Optimal docking problem of UAV at detected moving object. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2023. Vol. 120. Pp. 205–214.
- [4] Колесницький О. К., Арсенюк І. Р., Месюра В. І. Чисельні методи. Вінниця : ВНТУ, 2017. 130 с.
- [5] Задачин В. М., Конощенко І. Г. Чисельні методи. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.

Computational Fluid Mechanics with Phase Transitions by Particle Methods

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.025>

Gennadiy V. Sandrakov

Faculty of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
gsandrako@gmail.com

Abstract—A computational method of simulations for processes of heterogeneous hydrodynamics with take of phase transitions will be discussed. The method is based on relevant approximation of conservation laws for mass, momentum, and energy in integral and differential forms. The time and spatial approximation is natural and numerical simulations are realized as direct computer experiments. It is supposed that the fluids are compressible and non-viscous. Heterogeneities of the fluids are considered as small drops or particles of one fluid within other fluid. Total number of the drops may be large enough and the drops may have phase transitions. Therefore, simulations of the main fluid with small transited drops dynamics are considered. The particle dynamics will be modelled as in the particle-in-cell method, and in the main fluid as in the large particle method. This approach makes it possible to simulate phase transitions under certain assumptions about heterogeneous fluids. The calculation algorithm of this method is implemented as a computer simulation of the dynamics of a multiphase carrier fluid containing particles that can undergo, for example, graphite-diamond phase transitions. Such transitions are modelled on the basis of the theory of phase transformations and the laws of thermodynamics. In fact, the method is a combination of the Harlow's particle-in-cell method, Belotserkovskii's large particles method and Bakhvalov's homogenization method. A modification of this method has also been developed to take into account the effects of viscosity when simulating the dynamics of a multiphase fluid in porous media. A model of the motion of such a liquid in a porous medium is obtained by freezing the motion of particles of the corresponding size in the presented method. The method will certainly be promising for numerical simulations of absorption and diffusion processes in complex fluids with phase transitions.

Keywords—conservation laws; particle-in-cell; large particles; approximation; homogenization; multiphase models; porous media.

I. INTRODUCTION

Mathematical and computational modeling plays a significant role in understanding the phenomena and processes that are investigated in modern physics and chemistry. The modeling can help interpret and even prediction new phenomena. Researching the physical and chemical processes which are in heterogeneous media at large speeds, high pressures and energies in the field of phase transitions, it is required to have accurate values of pressures, energies and velocities arising at

various points of these substances at suitable times. Such values are significant in order to understand the state of media and the phase transitions that have taken place. The determination of such values is possible on the basis of modeling of nonlinear hydrodynamic processes in heterogeneous fluids.

The significance of this problem is due to the intensive development of the branches of physics and chemistry associated with the study of dynamic processes occurring during pulsed loading and the passage of shock waves in metals, polymers and heterogeneous composites [1]. The study of such processes is necessary for the development of new technologies that use the methods of pulsed and shock loading, which make it possible to synthesize new substances. The formation of new substances, their modifications and phases is associated with physicochemical processes initiated at high pressures and energies. The calculation of such wave processes is complicated, since these physicochemical processes strongly affect the behavior of the initiating waves. In addition, phase transitions under the action of waves loading can lead to multi-front waves. To analyze these processes, the development of mathematical models are necessary, taking into account the basic principles of the theory of phase transformations, and the construction of highly efficient computational method and algorithms.

Thus, the computational method of simulations for processes of heterogeneous hydrodynamics with take of phase transitions will be discussed. It is supposed that the fluids are compressible and non-viscous. Heterogeneities of the fluids are considered as small drops or particles of one fluid within other fluid. Total number of the drops may be large enough and the drops may have phase transitions. Therefore, simulations of the main fluid with small transited drops dynamics are considered. In fact, the method is a combination of the Harlow's particle-in-cell method [2], large particles method [3] and homogenization method [4] that is based on conservation laws.

II. METHODS

Actually, there are no real models for processes describing the behavior of heterogeneous materials at high pressure and energy in the field of phase transitions in the available literature. The problem of the models, taking into account the basic provisions of the phase transition theory, was posed by V. Yudovich as one of

the main problems of mathematical physics. This problem is not solved here, but a possible approach will be discussed for calculating the parameters of heterogeneous media at large speed, high pressure and energy in the field of phase transitions. The approach is based on an approximation of conservation laws for mass, momentum, and energy of fluids and performing simulations on relevant time intervals [5]. Initially, such an approach to this problem was proposed in [6].

An alternative approach to this problem is known, which is based on the concept of multiphase continuous media. In the case, the assumptions of a multi-speed continuum and interpenetrating motions of the components are accepted when deriving multiphase equations for suitable models. In a sense, this concept means the simultaneous presence of several materials at each point of the space under consideration; further details can be found in [1]. Also, the general multiphase equations for such multi-speed continuous media are not closed and contain indefinite terms. In such equations, for example, the terms of describing the redistribution of energies between phases during the development of the dynamics of multiphase media are not definite. Various physical experiments are necessary for solving of the problem in concrete cases. The situation is more difficult whenever phase transitions are admissible.

For the problems of diffusion and elasticity dynamics in heterogeneous composite media, there is a rigorous mathematical approach leading to multiphase homogenization models, which was originally presented in [7]. In the multiphase models, the media are not considered as several materials at each point of the space simultaneously. In these results, the solutions to the relevant multiphase equations for each phase are restrictions on the corresponding phase that can interact through the interchange terms. Such interchange terms are defined explicitly and so the problem of describing the redistribution of energies between phases does not arise when considering the dynamics of the multiphase media. This approach is also used in the method for mathematical modeling of structurally heterogeneous materials as heterogeneous fluids dynamics, which is presented here. The problem of describing energy redistribution between phases does not arise when this method is implemented. Energy redistribution in this method is performed through the assumption that the local pressure in each phase is the same. The assumption is natural according [1] and will be used in conjunction with particle-in-cell and large particles methods for the modeling of fluid mechanics with phase transitions.

Some trial and preliminary computer experiment results may be found in [8]. More details of the method and other modifications may be found in [8; 9]. It seems very important to realize the generalization of this method to be used for simulating the dynamics of a multiphase fluid in porous media in accordance with [8]. Alternative methods for the problems with relevant references may be found, for example, in [11] and [12].

III. CONCLUSIONS

Thus, the computational method of simulations for heterogeneous fluid dynamics with phase transitions is discussed. The method is based on approximation of conservation laws for masses, momentums, and energies

in integral and differential forms. The approach is natural and numerical simulations are realized as direct computer experiments. The method seems to be much more adequate to the physical and mathematical essence of the dynamics because conservation laws are fulfilled on the discrete level. The calculation algorithm of this method is implemented as a computer simulation of the dynamics of a multiphase carrier fluid containing particles that can undergo, for example, graphite-diamond phase transitions. Such transitions are modeled on the basis of the theory of phase transformations and the laws of thermodynamics. A modification of this method has also been developed to take into account the effects of viscosity when simulating the dynamics of a multiphase fluid in porous media. The discussed method will certainly be promising for numerical simulations of other absorption and diffusion processes in complex fluids and multiphase fluids in porous media.

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] R. I. Nigmatulin. Dynamics of multiphase media. New York : Hemisphere, 1991.
- [2] F. Harlow. Numerical particles-in-cells method. Fundamental methods in hydridinamics. New York : Academic Press, 1964.
- [3] Yu. N. Grigoriev, V. A. Vshivkov, and M. P. Fedoruk. Numerical Particle-In-Cell Methods: Theory and Applications. Boston : Utrecht, 2002.
- [4] N.S. Bakhvalov, and G. Panasenko. Homogenisation: averaging processes in periodic media. Springer Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [5] O. Yu. Grishchenko, S. I. Lyashko, and O. I. Molodtsov. Numerical Modelling of Relaxation Processes Gas Dynamics. Kyiv : Kyiv University, 1997. (in Ukrainian).
- [6] G. V. Sandrakov, and S.B. Boyko. Mathematical modeling of complex heterogeneous fluid dynamics. *J. Num. Appl. Math.* 2011. Vol. 1(104). Pp. 109–120 (in Ukrainian).
- [7] G. V. Sandrakov. Computational algorithms for multiphase hydrodynamics models and filtration. *J. Num. Appl. Math.* 2022. Vol. 1. Pp. 46–61 (in Ukrainian). Doi: 10.17721/2706-9699.2022.1.04
- [8] G. Sandrakov. Modeling of heterogeneous hydrodynamics processes with phase transition. *Modeling, Control and Information Technologies.* 2019. Vol. 3. Pp. 67–68. Doi: 10.31713/MCIT.2019.18
- [9] G. Sandrakov. A modified method for modeling of heterogeneous hydrodynamics processes. *Modeling, Control and Information Technologies.* 2020. Vol. 4. Pp. 63–66. Doi: 10.31713/MCIT.2020.06
- [10] Z. B. Wang, R. Chen, H. Wang, Q. Liao, X. Zhu, and S. Z. Li. An overview of smoothed particle hydrodynamics for simulating multiphase flow. *Applied Math. Modelling.* 2016. Vol. 40(23-24). Pp. 9625–9655. Doi: 10.1016/j.apm.2016.06.030
- [11] K. Kormann, and E. Sonnendrücker. Energy-conserving time propagation for a structure-preserving particle-in-cell Vlasov-Maxwell solver. *J. Comput. Physics.* 2021. Vol. 425. 109890. Doi: 10.1016/j.jcp.2020.109890

Mathematical and computer models for predicting greenhouse gas emissions from soil into the atmosphere: review and comparison

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.026>

Liubov Shostak

Department of Computer Sciences and Applied
Mathematics
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
l.v.shostak@nuwm.edu.ua

Olha Stepanchenko

Department of Computer Sciences and Applied
Mathematics
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine

Petro Martyniuk

Department of Computer Sciences and Applied
Mathematics
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine

Olena Belozeroва

Department of Computer Sciences and Applied
Mathematics
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine

Abstract—Climate change is one of the pressing global issues facing humanity. Greenhouse gases play a pivotal role in this process, as they are emitted from the soil and interact with the atmosphere, altering the climate balance. This article explores mathematical and computer models used to estimate the volumes of gas emissions from the soil, aiming to identify current and effective approaches for monitoring such emissions, taking into account land use types. Essential parameters for modeling greenhouse gas migration processes and monitoring their impact on climate change are defined.

In this study, we undertake a comparative analysis of models used to assess this process, considering climatic conditions, soil type, and particle size distribution, is provided. The results of model comparisons can be employed to evaluate greenhouse gas emissions, study their influence on climate change, and develop strategies to combat global warming.

Keywords—greenhouse gases, carbon dioxide, soil respiration, mathematical model, information system, carbon, methane, soil organic matter.

I. INTRODUCTION

The soil environment is one of the essential conditions for the existence of living organisms on planet Earth. In this ecosystem, continuous processes of organic matter transformation take place. One of the outcomes of such processes is the emission of greenhouse gases into the atmosphere.

These gases are among the primary components that have a significant impact on climate change. As stated in [1]: “Climate change, caused by greenhouse gas (GHG) emissions, is one of the most serious threats facing our planet, and is of concern at both UK and devolved administration levels. Accurate predictions for the

effects of changes in climate and land use on GHG emissions are vital for informing land use policy”.

Agricultural lands serve as a source of greenhouse gas emissions. Assessing the volume of emissions of these gases is necessary for developing a strategy to maintain the balance between the natural environment and human agricultural activities. In our review study, we compare mathematical models and information systems used to predict and estimate the volumes of greenhouse gas emissions.

II. MODELS FOR PREDICTING GREENHOUSE GAS EMISSIONS

A. Model DNDC

DNDC (DeNitrification-DeComposition) is an information system based on a mathematical model developed to assess the dynamics of carbon and nitrogen in agroecosystems, taking into account the impact of agricultural activities on climate change. This model has several modifications that can be used to estimate greenhouse gas emissions in agroecosystems, mountainous and wetland forest ecosystems, pastures, and livestock farms. It describes the interaction between soil, plants, and the atmosphere and considers processes related to the emissions of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), nitric oxide (NO), dinitrogen (N₂), and ammonia (NH₃).

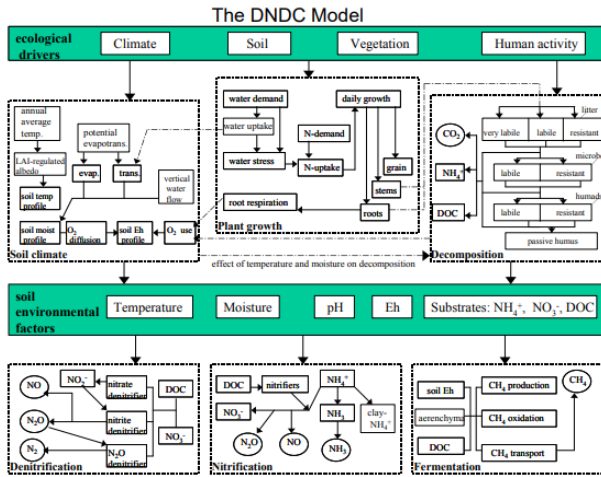


Figure 1. Model Structure [3, p. 8]

The DNDC model also describes the impact of agricultural practices on carbon dioxide sequestration, models daily plant growth and crop yield, simulates the migration of nutrients in the soil environment, and their uptake by plants.

To calculate greenhouse gas emissions in the DNDC model, data on soil type, climatic conditions, and land use methods are also employed. According to the statement in [4]: “The model uses the parameters of heat transfer rate, specific heat capacity, and thermal conductivity of soil to calculate soil temperature layer by layer and balances the relationship of input water and output water to calculate the soil moisture of each layer”.

The change in carbon (C) and nitrogen (N) quantities in the model varies relative to their amounts in the aboveground ecosystem. The model takes into account the influence of moisture and temperature at different soil depths.

The primary sources of greenhouse gas generation and absorption include processes such as organic residue decomposition, nitrification, denitrification of nitrogen, and fermentation, which leads to methane production.

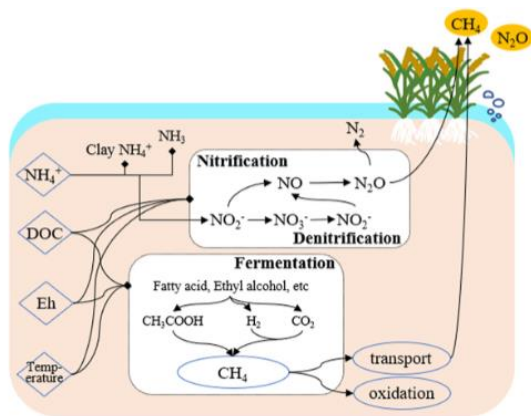


Figure 2. The scheme of greenhouse gas emission process in the DNDC model [4, p. 143]

B. Model DAMM

DAMM (Dual Arrhenius and Michaelis–Menten Kinetics Model) is a mathematical model based on the Michaelis–Menten equation. This equation describes the

rate of enzymatic reactions as a function of the concentration of an organic substrate.

In this model, various sources of substrate input and microorganisms that transform it can be incorporated.

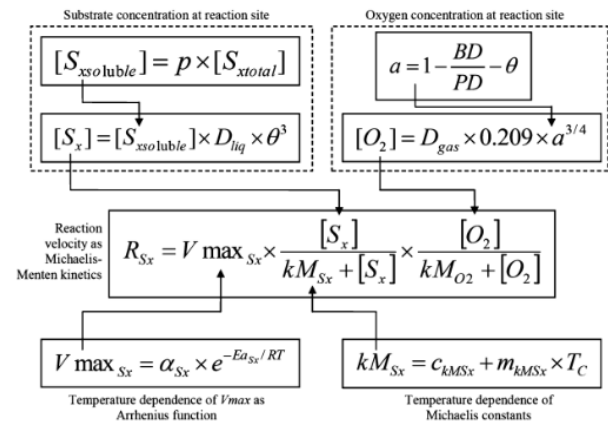


Figure 3. Graphical representation of the DAMM model [5, p. 372]

According to article [6]: “In its current form, it would not be suitable for several potentially important applications, such as permafrost thaw or methane fluxes. Most importantly, it only addresses fast-response soil heterotrophic respiration processes and is not yet connected to processes related to C inputs or to C stabilization”.

The DAMM (Dual Arrhenius and Michaelis–Menten Kinetics Model) takes into account the influence of temperature, soil moisture, and the concentration of soluble substrates on the transformation of organic carbon substrates in the soil. The concentrations of dissolved carbon and oxygen in the soil are modeled using diffusion equations. Since the model considers oxygen, it can be applied to simulate aerobic respiration, which is most common in mountainous soils. This model can also be modified as needed.

C. Model DETECT (DEconvolution of Temporally varying Ecosystem Carbon componentS)

This is a mathematical model of physical processes for predicting, generating, and migrating carbon dioxide in the soil environment based on depth and time. The model considers that carbon dioxide is generated as a result of root respiration, as well as the activities of associated microorganisms and microbial processes.

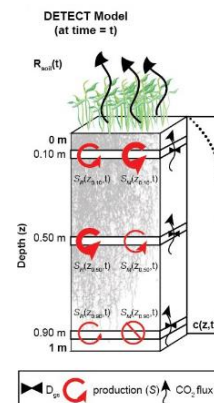


Figure 4. Graphical representation of DETECT model components [7, p. 1912]

Effective diffusion of carbon dioxide through the soil is assumed to be the same for CO₂ originating from roots and microorganisms. The model assumes that CO₂ transport in the soil profile occurs through diffusion mechanisms. According to article [7]: “Although DETECT v1.0 assumes that root and microbial respiration are independent of one another, they both depend on the same environmental data”.

The maximum potential decomposition and respiration rates of free-living soil microorganisms vary with depth and time, unlike DAMM (which does not vary with depth). The model accounts for both the dissolved and microbial carbon pools and is relevant for systems not limited by the presence of oxygen.

Soil temperature and moisture are calculated using a separate HYDRUS model [18]. The model considers that previous temperature and moisture levels influence the formation of carbon dioxide. The decomposition process in the DETECT model is described by Michaelis–Menten kinetics.

The model does not consider diffusion in the liquid phase, convection, or transportation through vertical water movement.

D. Model DAYCENT (Daily Century)

The DAYCENT (Daily Century) model is a mathematical model described by a dynamic system and is used to predict the dynamics of biogeochemical processes in ecosystems, including carbon dioxide emissions from the soil. This model is developed based on the CENTURY model with a daily time step and accounts for more complex processes such as nitrogen leaching and the presence of soil carbon in various forms. The model consists of submodels that assess nitrogen and carbon fluxes, plant productivity, organic residue decomposition, soil water dynamics, and temperature.

According to article [9]: “DAYCENT simulates exchanges of carbon, nutrients, and trace gases among the atmosphere, soil, and plants as well as events and management practices such as fire, grazing, cultivation, and organic matter or fertilizer additions”.

DAYCENT simulates the emissions of nitrogen gases resulting from nitrification and denitrification processes.

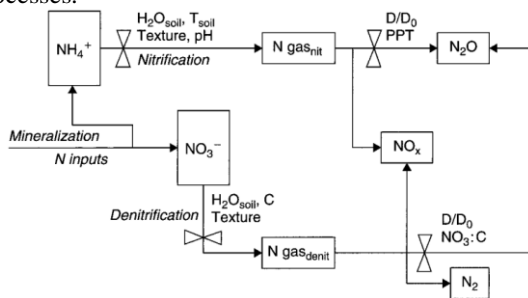


Figure 5. Diagram of the N gas flux submodel in the DAYCENT model [9, p. 575]

The model also assesses methane and carbon emissions from the soil environment. According to the statement in [10]: “Total C flow out of the active pool is a function of potential decomposition rates modified by the effect of moisture, temperature, pH, and soil texture”.

E. Model PaSim (Pasture Simulation Model)

As stated in [11]: “PASIM is a biogeochemical grassland ecosystem model that simulates fluxes of C, N, water, and energy at the soil-plant-atmosphere interface, as well as net primary productivity and forage intake by domestic herbivores”.

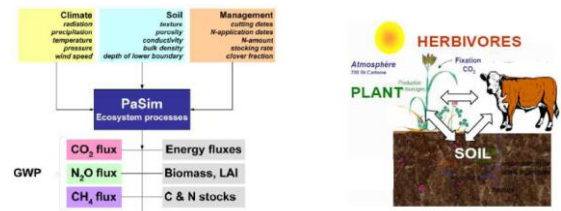


Figure 6. Model Schema of PaSim [11, p. 1]

When modeling the ecosystem, factors such as soil carbon content, plant organic matter content, and nutrient levels are taken into account.

In PaSim, three sources of carbon dioxide formation are considered: autotrophic respiration, organic residue decomposition, and heterotrophic respiration. It accounts for nitrogen processes such as mineralization, nitrification, and denitrification.

Carbon content is influenced by the dynamics of changes in the quantity and quality of plant biomass in pastures. Additionally, the model considers the impact of pasture management practices (such as different fertilization methods and forage harvesting) on the carbon balance.

PaSim has limitations regarding modeling high temperatures and severe droughts.

F. Model ECOSSE

The mathematical model ECOSSE (Ecosys Climate Change Soil Emission model) simulates the impact of land use on climate change, greenhouse gas emissions, carbon and nitrogen stocks in soils, and models the process of organic matter biodegradation.

According to the statement in [13]: “The ECOSSE model was developed to simulate highly organic soils from concepts originally derived for mineral soils in the RothC and SUNDIAL models”.

The model takes into account that during aerobic decomposition of organic residues, carbon dioxide is emitted, while under anaerobic conditions, methane is produced. To enhance the accuracy of simulating soil processes, the model divides the soil into layers of 5 cm each.

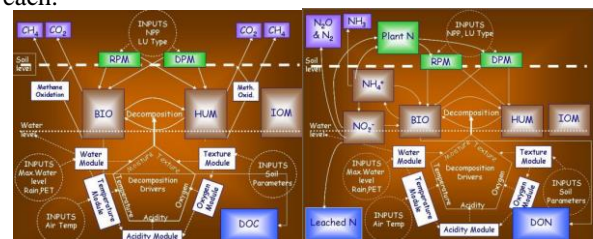


Figure 7. Model Schema (Structure of Carbon and Nitrogen Components of the Model) [13, p. 12]

In the model, each layer is considered a homogeneous unit that produces carbon dioxide under aerobic conditions. Additionally, emissions of nitrogen resulting from denitrification and partial nitrification are also simulated.

III. CONCLUSIONS

Therefore, mathematical and computer models for predicting greenhouse gas emissions contain the following components: modeling the thermal state of the soil, modeling the moisture state of the soil, modeling biological processes, modeling the influence of anthropogenic factors, and modeling the interaction between plants and soil.

Each of the models discussed has its own specific features and advantages that can be utilized for the determination and prediction of greenhouse gas emissions from the soil.

Considering the diversity of the models discussed, it is important to take into account the initial dataset and the forecasting objectives before selecting a specific model.

REFERENCES

- [1] J. Smith, P. Gottschalk, J. Bellarby, M. Richards, D. Nayak et al. *Model to Estimate Carbon in Organic Soils – Sequestration and Emissions (ECOSSE)*. [Online]. URL: <https://www.abdn.ac.uk/staffpages/uploads/soi450/ECOSSE%20User%20manual%20310810.pdf>. (Accessed: October 15, 2023).
- [2] E. M. Ryan, K. Ogle, H. Kropp, K. E. Samuels-Crow, Y. Carrillo, and E. Pendall. Modeling soil CO₂ production and transport with dynamic source and diffusion terms: Testing the steady-state assumption using DETECT v1.0. *Geoscientific Model Development*. 2018. Vol. 11(5). Pp. 1909–1928.
- [3] User's Guide for the DNDC Model (Version 9.5). [Online]. URL: <https://www.dnrc.sr.unh.edu/model/GuideDNDC95.pdf>. (Accessed: October 15, 2023).
- [4] S. Yin, X. Zhang, J. Lyu, Y. Zhi, F. Chen et al. Carbon sequestration and emissions mitigation in paddy fields based on the DNDC model: A review. *AI Agric*. 2020. Vol. 4. Pp. 140–149.
- [5] E. A. Davidson, S. Samanta, S. S. Caramori and K. Savage. The Dual Arrhenius and Michaelis–Menten kinetics model for decomposition of soil organic matter at hourly to seasonal time scales. *Glob Change Biol*. 2012. Vol. 18. Pp. 371–384.
- [6] E. A. Davidson, K. E. Savage, A. C. Finzi. A big-microsite framework for soil carbon modeling. *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20(12). Pp. 3610–3620.
- [7] E. M. Ryan, K. Ogle, H. Kropp, K. E. Samuels-Crow, Y. Carrillo, and E. Pendall. Modeling soil CO₂ production and transport with dynamic source and diffusion terms: Testing the steady-state assumption using DETECT v1.0. *Geoscientific Model Development*. 2018. Vol. 11(5). Pp. 1909–1928.
- [8] K. E. Samuels-Crow, E. Ryan, E. Pendall, and K. Ogle. Temporal Coupling of Subsurface and Surface Soil CO₂ Fluxes: Insights From a Nonsteady State Model and Cross-Wavelet Coherence Analysis. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2018. Vol. 123. Pp. 1406–1424. <https://doi.org/10.1002/2017JG004207>.
- [9] S. J. Del Grosso, W. J. Parton, D. S. Ojima, C. A. Keough, T. H. Riley and A. R. Mosier. DAYCENT simulated effects of land use and climate on county level N loss vectors in the USA. *Nitrogen in the Environment (Second Edition), Chapter 18*. 2008. Pp. 571–595.
- [10] S.R.S. Dangal, C. Schwalm, M. A. Cavigelli, and J. Sanderman. Improving Soil Carbon Estimates by Linking Conceptual Pools Against Measurable Carbon Fractions in the DAYCENT Model Version 4.5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2022. Vol. 14. Pp. 1–23. <https://doi.org/10.1029/2021MS002622>
- [11] A.-I. Graux, J.-F. Soussana, N. Brisson, D. Hill, and R. Lardy. Modelling climate change impacts on grasslands and possible adaptations of livestock systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2009. Vol. 6(24). Pp. 242046.
- [12] R. Lardy, and R. Martin. *Pasture Simulation model (PaSim)*. [Online]. URL: <https://hal.inrae.fr/hal-02808903/document>. (Accessed: October 15, 2023).
- [13] J. Smith, P. Gottschalk, J. Bellarby, M. Richards, D. Nayak et al. *Model to Estimate Carbon in Organic Soils – Sequestration and Emissions (ECOSSE)*. [Online]. URL: <https://www.abdn.ac.uk/staffpages/uploads/soi450/ECOSSE%20User%20manual%20310810.pdf>. (Accessed: October 15, 2023).
- [14] M. Dondini, M. Richards, M. Pogson, E.O. Jones, R. L. Rowe et al. Evaluation of the ECOSSE model for simulating soil organic carbon under Miscanthus and short rotation coppice-willow crops in Britain. *GCB Bioenergy*. 2016. vol. 8. Pp. 790–804.
- [15] Z. Miao-Miao, S. Rui, Y. Ji-Lin, Z. Fen, and X. Ming. Simulation of greenhouse gas fluxes in rice fields based on DNDC model. *Chinese Journal of Ecology*. Vol. 38(4). Pp. 1057–1066. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201904.030>
- [16] J. U. Smith, P. Gottschalk, J. Bellarby, S. Chapman, A. Lilly et al. Estimating changes in national soil carbon stocks using ECOSSE – a new model that includes upland organic soils. Part I. Model description and uncertainty in national scale simulations of Scotland. *Climate Research*. Vol. 45. Pp. 179–192.
- [17] DNDC (Version 9.5). Scientific Basis and Processes. [Online]. URL: https://www.dnrc.sr.unh.edu/papers/DNDC_Scientific_Basis_and_Processes.pdf. (Accessed: October 15, 2023).
- [18] J. Šimůnek, M.T. van Genuchten, and M. Šejna. HYDRUS: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*. 2012. Vol. 55(4). Pp. 1261–1274.
- [19] K. Coleman, and D.S. Jenkinson. ROTHC-26.3 - A model for the turnover of carbon in soil. Evaluation of Soil Organic Matter Models. 1996. Vol 38. Pp. 237–246.
- [20] K. E. Samuels-Crow, E. Ryan, E. Pendall, and K. Ogle. Temporal Coupling of Subsurface and Surface Soil CO₂ Fluxes: Insights From a Nonsteady State Model and Cross-Wavelet Coherence Analysis. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2018. Vol. 123. Pp. 1406–1424. <https://doi.org/10.1002/2017JG004207>.
- [21] Z. Chen, J. Wang, N. Deng, C. Lv, Q. Wang et al. Modeling the effects of farming management practices on soil organic carbon stock at a county-regional scale. *Catena*. 2018. Vol. 160. Pp. 76–89.
- [22] D. Lawton. Observations and modelling of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane using PaSim at an Irish grassland site. 2005.
- [23] M. Abdalla, X. Song, X. Ju, C.F.E. Topp, P. Smith. Calibration and validation of the DNDC model to estimate nitrous oxide emissions and crop productivity for a summer maize-winter wheat double cropping system in Hebei. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 262. Pp. 114199.

Modeling of the solitary waves trajectories in “shallow water” environments

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.027>

Yurii Turbal

Computer Science and Applied Mathematic
department
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
turbaly@gmail.com

Mariana Turbal

Computer Science and Applied Mathematic
department
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
Turbal.mariana.1@gmail.com

Andrii Bomba

Computer Science and Applied Mathematic department
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
abomba@ukr.net

Abstract—Solitary waves in the “shallow water” environment are considered and approximate approach to calculation and prediction of trajectories of these waves is proposed. We use an approach which was developed in recent years and was called the T-representations method. This method allows to move away from the exact solutions of the corresponding systems of differential equations and construct the trajectory approximately, in fact estimating only the point of maximum of the wave amplitude and its displacement. An appropriate mathematical simplification makes efficient computer simulations possible. In recent years, software packages have been actively used to monitor and predict a number of dangerous natural phenomena, such as Earth Alerts, Pacific Tsunami Warning System, Wave Monitoring Sites and others. But these systems do not take solitary waves into account. Using our approach, it is possible to refine the parameters of solitary waves in a specific environment, investigate whether such waves exist there at all and create functions taking into account solitary waves in monitoring systems.

Keywords—solitary wave; shallow water; T-representation; trajectory prediction; software.

I. INTRODUCTION

Software packages containing prediction modules that use the properties of localized soliton-like waves have been actively developed [12]. In this case, localized soliton-like perturbations are considered in various aspects. In the study of seismic processes [15; 16] for example, a separate wave can be considered as a generator of seismic shock, if it passes through the zone of accumulation of seismic energy. A similar effect can occur when several waves hit an area at the same time, because then there may be cracks in the earth's crust and, accordingly, seismic shocks (such an effect occurred, for example, in an earthquake in Fukushima Prefecture, Japan in 2016). In such cases, it is important to identify the soliton and predict its trajectory. Information about the trajectories of isolated waves and the nature of their movement is of great practical importance in cases where the isolated waves

themselves pose a danger (such as a tsunami) [1; 2]. If the soliton occurs on the surface of water, it can also be dangerous, for example, in the case of the so-called killer wave, studied in the MaxWave project [1]. Therefore, the study of the trajectories of localized waves is a very important task.

The problem of modeling the processes of origin and propagation of isolated waves has several aspects, in particular, an analytical description of the wave profile and the presence of a number of specific properties of soliton [3–7], which are guaranteed by some methods at the stage of their application and do not require further study. The presence of such methods determines their complexity. Mathematical models that describe the propagation of isolated waves are divided into two classes: integrated and non-integrated using the method of the inverse scattering problem [2–7; 10; 11] in collisions they retain their characteristics and there is only a phase shift. Many papers have shown that in integrated models localized waves behave like particles. This fact has been confirmed in numerous experiments in which plasma waves, liquid with gas bubbles, stratified liquid and electromagnetic waves have been studied. At the same time, for systems that do not integrate using the inverse scattering problem, a number of other effects occur, including radiation of nonlinear wave trains, splitting of individual waves and formation of new soliton-like waves, merging of several waves and formation of a new series of elastic reflections.

At the same time, the wave profile may change over time, then such a wave will no longer be a soliton in the classical sense, but may have soliton properties that require further study. Soliton solutions of equations considered in the framework of the structural-phenomenological approach, for example, are isolated partial cases of solutions and do not make it possible to solve the problem of formation of a separate wave from an arbitrary initial perturbation. The use of δ -solitons in the asymptotic case allows you to ignore the shape of the wave profile. However, general functions as models

of real physical phenomena have a number of disadvantages, including infinity, specific mathematical content of derivatives, and others.

The analytical description of isolated waves in multidimensional cases is especially problematic now [2]. Even for a well-studied system of equations such as "shallow water" [1, 14], periodic analytical solutions have only recently been found and the author does not know the methods of analytical study of isolated waves.

II. T-FORMS FOR THE SHALLOW WATER ENVIRONMENTS

A number of approaches to finding soliton solutions of the corresponding differential equations are known today. The method of the inverse scattering problem plays a fundamental role. There is an infinite number of differential equations that can be differentiated using this method. However, the method does not exhaust all the equations that soliton solutions can have. In addition, there are other methods that allow us to find both exact and approximate soliton solutions of differential equations. However, the corresponding methods are often special in nature and are effective only for a certain class of equations. Most of them relate to the one-dimensional case.

In recent years, in order to constructively study the trajectories of localized soliton-like perturbations, a slightly different approach has been proposed, called the T-representation method. This method has approximate variants when the solutions are Gaussian and can easily be extended to multidimensional cases.

In [12], a method for finding solutions of equations of motion is presented in the form of:

$$\begin{aligned} & (u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(m)})^T = \\ & = (\psi_1(t), \psi_2(t), \dots, \psi_m(t))^T W(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \end{aligned} \quad (1)$$

where $u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(m)}$ are the displacements in the Cartesian coordinate system,

$$\begin{aligned} & W(x_1, x_2, \dots, x_n, \tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), \dots, \tilde{x}_n(t), t) = \\ & = \exp(-\mu((x_1, x_2, \dots, x_n), (\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), \dots, \tilde{x}_n(t)))) / \varepsilon) \end{aligned}$$

$\mu(a, b)$ is a measure defined on a set of intervals $\{[a, b], a, b \in \mathbb{R}^n\}$, ($\mu(\alpha, \beta) = 0$ if $\alpha = \beta$), $\psi_1(t)$, $\psi_2(t)$, ..., $\psi_m(t)$ are functions that determine the components of the amplitude of the corresponding perturbations, ε is a parameter that determines the localization of the perturbation, $\tilde{x}_1(t)$, $\tilde{x}_2(t)$, ..., $\tilde{x}_n(t)$ are functions that determine the trajectory of the point of maximum perturbation.

The solution in the form (1) defines a localized wave, the maximum of which is at a point $(\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), \dots, \tilde{x}_n(t))$. Note that in the case of an arbitrary measure μ , in form (1) we can represent an arbitrary solution that has the character of a unimodal isolated wave, the shape of which does not change with time. The measure μ determines the form of perturbation. We can consider a more general case when

the functions $\tilde{x}_i(\cdot)$ depend not only on time but also on spatial coordinates $\tilde{x}_i(t) = \tilde{x}_i(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$

Shallow water equations are of great practical importance because they describe large-scale atmospheric and ocean currents, particularly in midlatitudes. In Cartesian coordinates, they have the form [15]:

$$\begin{aligned} & u_t + uu_x + vu_y + gh_x = fv, \\ & v_t + uv_x + vv_y + gh_y = -fu, \\ & h_t + (uh)_x + (vh)_y = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

where u , v are components of the velocity vector, h is the depth of the liquid layer above the flat bottom; f is the Coriolis parameter (rotation frequency), g is the acceleration of free fall. The approximate model (2) is obtained from Euler's equations [14] of an ideal fluid under the following assumptions: the ratio of the characteristic vertical scale of the flow to the characteristic horizontal scales is much less than 1; the density of the liquid became; the pressure in the liquid is hydrostatic at depth; the axis of rotation coincides with the vertical axis z .

Note that the shallow water equations are usually solved by numerical methods due to significant difficulties in obtaining analytical solutions. In recent years, group theory methods have been used to analyze shallow water-type equations [13–15]. In particular, with the help of group analysis methods the Lie algebra in the absence of rotation is constructed, in [14] a system of subalgebras containing 179 representatives is constructed. On the basis of the corresponding algebra, periodic exact solutions are constructed, which can be interpreted as pulsations of a liquid under the action of gravity or Coriolis. Numerical methods for solving shallow water equations show that there are solutions that simulate isolated waves, such as circular tsunami waves.

The system of shallow water equations can easily be generalized to the case of polytropic gas flow, which is considered in the barotropic approximation. The motion of a compressible viscous gas can be conveniently studied in the polar coordinate system.

Such problems include a number of applied engineering and geophysical problems, including the study of atmospheric phenomena on a planetary scale, the study of astrophysical objects associated with the motion of matter around the center of gravity, including the gas disks of galaxies. The shallow water type equations in the polar coordinate system will look like this:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \sigma \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{r \partial \varphi} \right) + u \frac{\partial \sigma}{\partial r} + \frac{v \partial \sigma}{r \partial \varphi} = 0, \\ & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{v^2}{r} = -\frac{\partial \Phi}{\partial r} - B \gamma_s \sigma^{\gamma_s - 2} \frac{\partial \sigma}{\partial r} \quad (3) \\ & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} - \sigma^{\gamma_s - 2} \frac{B \gamma_s}{r} \frac{\partial \sigma}{\partial \varphi}, \end{aligned}$$

where $u(r, \varphi, t)$, $v(r, \varphi, t)$ are radial and azimuthal components of gas velocity, respectively, $\sigma(r, \varphi, t)$ is surface density of the gas disk, $\Phi(r, \varphi, t)$ is potential that describes the action of an external force, B, D are positive constants. Note that system (3) is quasilinear.

Based on the above-described method of T-representations, the vector-function of perturbations will be found in the form:

$$f_1(r, \varphi, t) = \varepsilon_0 \psi_f(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon), \quad (4)$$

where $\psi_f(t) = (\psi_u(t), \psi_v(t), \psi_\sigma(t))$, $\psi_u(t)$, $\psi_v(t)$, $\psi_\sigma(t)$, $\tilde{r}(t)$, $\tilde{\varphi}(t)$ are any functions, $\tilde{r}(t) \geq 0$, $\psi_\sigma(t) \geq 0$, ε is small parameter, ε_0 is constant, $\omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = \exp\left\{-\frac{g(r-\tilde{r}(t)) + g(\varphi-\tilde{\varphi}(t))}{\varepsilon}\right\}$, $g(x)$ is a function that has properties:

1. $g(x) \geq 0$, $x \in (-\infty, +\infty)$,
2. $g(0) = 0$,
3. $g(-x) = g(x)$,
4. Exists constants $\alpha_1, \tilde{\alpha}_1, \alpha_2, \tilde{\alpha}_2, c_1 > 0, c_2 > 0, \varepsilon > 0$ those that,

$$\tilde{c}_1 g^{\tilde{\alpha}_1}(x) \leq |g'(x)| \leq c_1 g^{\alpha_1}(x), |g''(x)| \leq c_2 g^{\alpha_2}(x)$$

in region $\{x : g(x) \leq -\varepsilon \ln \varepsilon\}$.

We see that in this case the perturbation is a single wave, and the point of maximum perturbation moves along the trajectory described in the polar coordinate system by the functions $\tilde{r}(t)$ and $\tilde{\varphi}(t)$.

III. ANALYSIS OF THE TRAJECTORY OF LOCALIZED WAVES

As a result of substituting (4) into the system (3) and taking into account the properties of the function $g()$, we can obtain systems:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_\sigma'(t) + \sigma_0 \frac{\psi_u(t)}{r} + \psi_u(t) \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} + \frac{\psi_v(t)}{r} \frac{\partial \sigma_0}{\partial \varphi} + \\ + \frac{1}{r} \varepsilon_0 \psi_\sigma(t) \psi_u(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0, \\ \tilde{\varphi}'(t) - \frac{v_0}{r} - \psi_v(t) \frac{\sigma_0}{r \psi_\sigma(t)} - \\ - \frac{2\varepsilon_0}{r} \psi_v(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0, \\ \tilde{r}'(t) - \sigma_0 \psi_u(t) / \psi_\sigma(t) - 2\varepsilon_0 \psi_u(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0. \\ \\ \psi_u'(t) - \frac{2v_0 \psi_v(t)}{r} - \frac{3}{2r} B D (\gamma_s - 1) \sigma_0^{\gamma_s - 2} \psi_\sigma(t) - \\ - \frac{\varepsilon_0 \psi_v^2(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon)}{r} + \\ + B \gamma_s (\gamma_s - 2) \psi_\sigma(t) \sigma_0^{\gamma_s - 3} \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} = 0, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{r}'(t) - B \gamma_s \sigma_0^{\gamma_s - 2} \psi_\sigma(t) / \psi_u(t) - \\ - B \gamma_s (\gamma_s - 2) \sigma_0^{\gamma_s - 3} \varepsilon_0 \psi_\sigma^2(t) / \psi_u(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) - \\ - \varepsilon_0 \psi_u(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0, \\ \tilde{\varphi}'(t) - \frac{v_0}{r} - \frac{\psi_v(t)}{r} \varepsilon_0 \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0. \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_v'(t) + \psi_u(t) \frac{\partial v_0}{\partial r} + \frac{\psi_u(t) v_0}{r} + \frac{\psi_v(t)}{r} \frac{\partial v_0}{\partial \varphi} + \\ + \frac{\psi_u(t) \varepsilon_0 \psi_v(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon)}{r} + \\ + \frac{B \gamma_s (\gamma_s - 2) \psi_\sigma(t) \sigma_0^{\gamma_s - 3} \frac{\partial \sigma_0}{\partial \varphi}}{r} = 0, \\ \tilde{r}'(t) - \psi_u(t) \varepsilon_0 \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0, \\ \tilde{\varphi}'(t) - \frac{v_0}{r} - \frac{B \gamma_s}{r} \sigma_0^{\gamma_s - 2} \psi_\sigma(t) / \psi_v(t) - \\ - \frac{B \gamma_s (\gamma_s - 2) \sigma_0^{\gamma_s - 3} \varepsilon_0 \psi_\sigma^2(t) / \psi_v(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon)}{r} - \\ - \frac{1}{r} \varepsilon_0 \psi_v(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0. \end{array} \right. \quad (7)$$

Let's analyze the equations containing $\tilde{r}'(t)$. Then we receive conditions:

$$\begin{aligned} \psi_u(t) \varepsilon_0 \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) &= B \gamma_s \sigma_0^{\gamma_s - 2} \psi_\sigma(t) / \psi_u(t) + \\ + B \gamma_s (\gamma_s - 2) \sigma_0^{\gamma_s - 3} \varepsilon_0 \psi_\sigma^2(t) / \psi_u(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) + \\ + \varepsilon_0 \psi_u(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) &= \\ = \sigma_0 \psi_u(t) / \psi_\sigma(t) + 2\varepsilon_0 \psi_u(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) \end{aligned}$$

From last equation we get:

$$\begin{aligned} B \gamma_s \sigma_0^{\gamma_s - 2} \psi_\sigma(t) / \psi_u(t) + \\ + B \gamma_s (\gamma_s - 2) \sigma_0^{\gamma_s - 3} \varepsilon_0 \psi_\sigma^2(t) / \psi_u(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sigma_0 + (\gamma_s - 2) \varepsilon_0 \psi_\sigma(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0,$$

$$\sigma_0 \psi_u(t) / \psi_\sigma(t) + \varepsilon_0 \psi_u(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0,$$

$$\sigma_0 + \varepsilon_0 \psi_\sigma(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0. \quad (9)$$

Comparing (8) and (9) we see that $\gamma_s = 3$. This result is very important because it corresponds to the case when the gas is in a state of ionized plasma. In addition, the ratio (9) shows that the surface density perturbation is negative.

Let us analyze equations for $\tilde{\varphi}'(t)$ in systems (5)-(7). We get:

$$\begin{aligned} \psi_v(t) \frac{\sigma_0}{r \psi_\sigma(t)} + \frac{2\varepsilon_0}{r} \psi_v(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) &= \\ = \frac{\psi_v(t)}{r} \varepsilon_0 \omega(r, \varphi, t, \varepsilon). \end{aligned}$$

From last equation we have:

$$\psi_v(t) \frac{\sigma_0}{r \psi_\sigma(t)} + \frac{\varepsilon_0}{r} \psi_v(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0.$$

We get equation (9).

Thus, we have system :

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{\sigma}'(t) + \sigma_0 \frac{\psi_u(t)}{r} + \psi_u(t) \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} + \\ + \frac{\psi_v(t)}{r} \frac{\partial \sigma_0}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \varepsilon_0 \psi_{\sigma}(t) \psi_u(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0, \\ \psi_u'(t) - \frac{2v_0 \psi_v(t)}{r} - \frac{3}{r} BD \sigma_0 \psi_{\sigma}(t) - \\ - \frac{\varepsilon_0 \psi_v^2(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon)}{r} + 3B \psi_{\sigma}(t) \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} = 0, \\ \psi_v'(t) + \psi_u(t) \frac{\partial v_0}{\partial r} + \frac{\psi_v(t)}{r} \frac{\partial v_0}{\partial \varphi} + \\ + \frac{\psi_u(t) v_0}{r} + \frac{\psi_u(t) \varepsilon_0 \psi_v(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon)}{r} = 0, \\ \tilde{\varphi}'(t) - \frac{v_0}{r} - \frac{\psi_v(t)}{r} \varepsilon_0 \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0, \\ \tilde{r}'(t) - \psi_u(t) \varepsilon_0 \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0, \\ \sigma_0 + \varepsilon_0 \psi_{\sigma}(t) \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

We will consider the system in the area $G_{\varepsilon}^{\alpha} = \{(r, \varphi, t) : g(r - \tilde{r}(t)) + g(\varphi - \tilde{\varphi}(t)) < \varepsilon^{1/\alpha_1}\}$. There are obvious inequalities in this area:

$$1 \geq \omega(r, \varphi, t, \varepsilon) = 1 - \varepsilon^{1/\alpha_1 - 1} + O(\varepsilon^{2/\alpha_1 - 2}), \\ g(r - \tilde{r}(t)) < \varepsilon^{1/\alpha_1}.$$

Using this inequalities we get:

$$|r - \tilde{r}(t)| < g^{-1}(\varepsilon^{1/\alpha_1}) \quad \text{or} \quad r = \tilde{r}(t) + \alpha g^{-1}(\varepsilon^{1/\alpha_1}), \\ \alpha_1 \in (-1, 1).$$

Then

$$\frac{\partial \sigma_0(r)}{\partial r} = \frac{\partial \sigma_0(\tilde{r}(t) + \alpha g^{-1}(\varepsilon^{1/\alpha_1}))}{\partial r} = \\ = \frac{\partial \sigma_0(\tilde{r}(t))}{\partial r} + \alpha g^{-1}(\varepsilon^{1/\alpha_1}) \frac{\partial^2 \sigma_0(\tilde{r}(t))}{\partial r^2} + \\ + o(\alpha g^{-1}(\varepsilon^{1/\alpha_1})).$$

Similarly, we can write other schedules. Then we get the following system, which will be executed with accuracy $O(g^{-1}(\varepsilon^{1/\alpha_1}))$:

$$\psi_{\sigma}'(t) + \sigma_0 \frac{\psi_u(t)}{\tilde{r}(t)} + \psi_u(t) \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} + \frac{\psi_v(t)}{\tilde{r}(t)} \frac{\partial \sigma_0}{\partial \varphi} + \\ + \frac{1}{\tilde{r}(t)} \varepsilon_0 \psi_{\sigma}(t) \psi_u(t) = 0, \\ \psi_u'(t) - \frac{2v_0 \psi_v(t)}{\tilde{r}(t)} - \frac{3}{\tilde{r}(t)} BD \sigma_0 \psi_{\sigma}(t) - \\ - \frac{\varepsilon_0 \psi_v^2(t)}{\tilde{r}(t)} + 3B \psi_{\sigma}(t) \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} = 0,$$

$$\psi_v'(t) + \psi_u(t) \frac{\partial v_0}{\partial r} + \frac{\psi_v(t)}{\tilde{r}(t)} \frac{\partial v_0}{\partial \varphi} + \\ + \frac{\psi_u(t) v_0}{\tilde{r}(t)} + \frac{\psi_u(t) \varepsilon_0 \psi_v(t)}{\tilde{r}(t)} = 0, \\ \tilde{\varphi}'(t) - \frac{v_0}{\tilde{r}(t)} - \frac{\psi_v(t)}{\tilde{r}(t)} \varepsilon_0 = 0, \\ \tilde{r}'(t) - \psi_u(t) \varepsilon_0 = 0, \\ \sigma_0(\tilde{r}(t), \tilde{\varphi}(t), t) + \varepsilon_0 \psi_{\sigma}(t) = 0.$$

Taking into account last equations and condition $D=0$ we get:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_u'(t) - \frac{2v_0 \psi_v(t)}{\tilde{r}(t)} - \frac{\varepsilon_0 \psi_v^2(t)}{\tilde{r}(t)} - \\ - 3B \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} \sigma_0(\tilde{r}(t), \tilde{\varphi}(t)) / \varepsilon_0 = 0, \\ \psi_v'(t) + \psi_u(t) \frac{\partial v_0}{\partial r} + \frac{\psi_v(t)}{\tilde{r}(t)} \frac{\partial v_0}{\partial \varphi} + \\ + \frac{\psi_u(t) v_0}{\tilde{r}(t)} + \frac{\psi_u(t) \varepsilon_0 \psi_v(t)}{\tilde{r}(t)} = 0, \\ \tilde{\varphi}'(t) - \frac{v_0}{\tilde{r}(t)} - \frac{\psi_v(t)}{\tilde{r}(t)} \varepsilon_0 = 0, \\ \tilde{r}'(t) - \psi_u(t) \varepsilon_0 = 0, \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_0}{\partial t} + \frac{v_0 \partial \sigma_0}{r \partial \varphi} = 0, \\ - \frac{v_0^2}{r} = - \frac{\partial \Phi_0}{\partial r} - B \gamma_s \sigma_0 \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} + \frac{3}{2r} DB \sigma_0^2, \\ \frac{\partial v_0}{\partial t} + \frac{v_0}{r} \frac{\partial v_0}{\partial \varphi} = - \sigma_0 \frac{3B}{r} \frac{\partial \sigma_0}{\partial \varphi}. \end{array} \right. \quad (12)$$

IV. CALCULATION OF THE TRAJECTORIES OF LOCALIZED PERTURBATIONS IN THE MATHCAD ENVIRONMENT

We will solve the system (11) in Mathcad 14.0 (see Fig.1.) In this case, we will simulate two solitons that have different velocities at the initial time. The initial conditions here are as follows. The first two values specify the radial and azimuthal components of the soliton velocity, the other two values are the initial coordinates of the soliton in the polar system, coordinate, radius and angle. We will consider the surface density as a function that depends only on the radius and choose it in the form:

$$g_0(r, \varphi) = C + B e^{-ar} + \sum_{i=0}^k a_i e^{-\frac{(r-R_i)^2}{l_i}}. \quad (13)$$

The simulation result is shown on Fig.3. The two solitons (blue and red trajectories) start from the points (0,380), (0,390), the azimuthal components are the same, but the radial ones are different and equal to 5 and 54, respectively. Interestingly, the amplitude of oscillations does not change, as does the frequency. This can be seen in the graph of Fig. 2.


```

R:=385 R1:=285 R2:=485 R3:=185
s0(r,fi):=10+10exp(-0.01r)+g1exp(-((r-R1)^2)/150)+g1exp(-((r-R2)^2)/150)+g1exp(-((r-R3)^2)/150)+g1exp(-((r-R3)^2)/150)
v0(r,fi):=0.001-r
dv0(r,fi):=d/dt(v0(r,fi)) dfv0(r,fi):=d/dt(v0(r,fi)) ds0(r,fi):=d/dt(s0(r,fi)) ds0(r,fi):=d/dt(s0(r,fi)) ds0(r,fi):=d/dt(s0(r,fi))
d/dt(y0(u))=2*v0(y3(u),y2(u))*y1(u)/y3(u)+3*B*s0(y3(u),y2(u))*ds0(y3(u),y2(u))+(eps*y1(u))/y3(u)
d/dt(y1(u))=-y0(u)*(dv0(y3(u),y2(u))+eps*y1(u)/y3(u)+v0(y3(u),y2(u))) - y1(u)*dfv0(y3(u),y2(u))/y3(u)
d/dt(y2(u))=eps*y1(u)/y3(u)+v0(y3(u),y2(u))
d/dt(y3(u))=(eps*y0(u))

```

$\begin{pmatrix} y0 \\ y1 \\ y2 \\ y3 \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left(\begin{matrix} y0 \\ y1 \\ y2 \\ y3 \end{matrix} , u, T1, 1000 \right)$

Figure 1. Example of Mathcad program for the system (11)

Let us consider another example, when the density has circular areas with small values, the constants in (13) are: $C = 11, B = 0, k = 4, l_i = 15, R = 385, R_1 = 285, R_2 = 485, R_3 = 185, a_i = 9.8$.

The graph of the function (13) is on Fig. 3. The initial conditions for the numerical experiment: first soliton (blue trajectory on Fig.5): $y_0(0)=5, y_1(0)=180, y_2(0)=0, y_3(0)=380$, second soliton (red trajectory on Fig.4) : $y_0(0)=35, y_1(0)=50, y_2(0)=0, y_3(0)=430$.

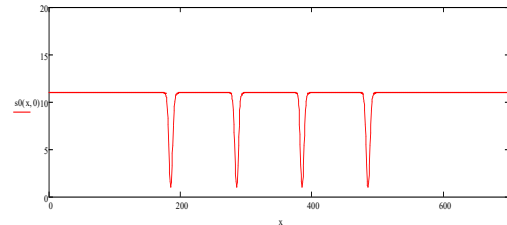


Figure 3. The graph of the surface density

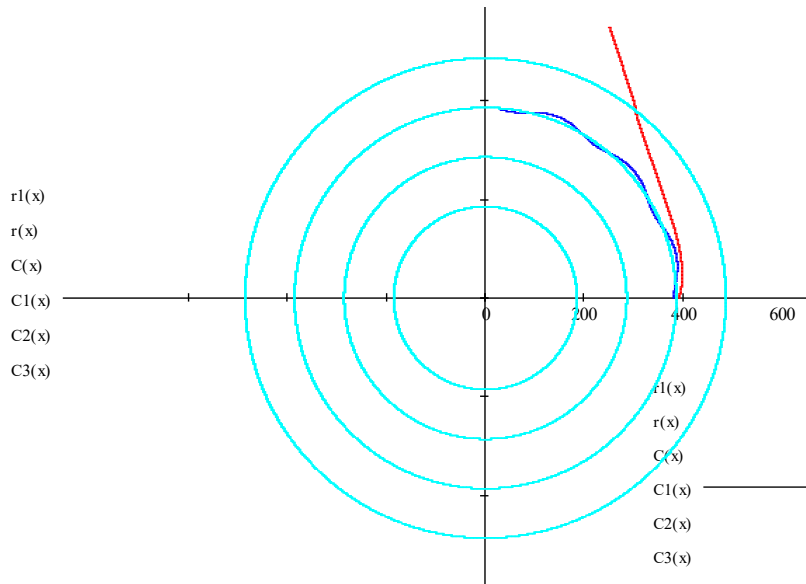


Figure 2. Trajectories of the two solitary waves

Initial condition for the waves are: first soliton (blue trajectory on Fig.3): $y_0(0)=5, y_1(0)=180, y_2(0)=0, y_3(0)=380$, second soliton (red trajectory on Fig.3): $y_0(0)=58, y_1(0)=180, y_2(0)=0, y_3(0)=390, T1=16.28, Eps=0.2, R=185, R1=285, R2=385, R3=485$.

In this case, the second soliton (red), which had a higher initial velocity, moves along a curvilinear trajectory, approaching a circle where the density has a local maximum, intersects it, the trajectory is refracted like a ray of light and then becomes virtually rectilinear. We see that for a large T the soliton moves away from the center, asymptotically approaching the motion along some straight line, moving away from the center.

The corresponding behavior of a slower soliton can be interpreted in two ways: approximation to the region of maximum density and repulsion from the region of minimum. Note that we actually have an antisoliton here, a negative perturbation of density. Since the density changes continuously, the soliton is smoothly knocked out. If we had a clear boundary of the regions of density change, we would obviously have the phenomenon of embossing like Snelius's law. Thus, the soliton in a continuous medium will move in the direction of maximum density in areas where it is a smooth function and will be reflected in the presence of a sharp change in density.

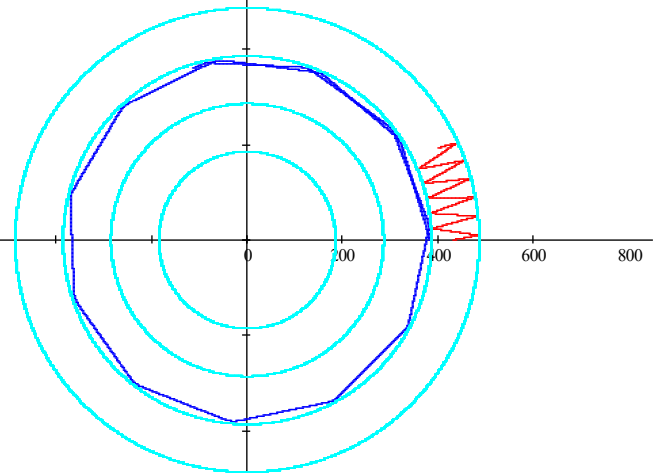


Figure 4. Example of the solitary wave trajectory

Other parameters are the same as in the previous example. On the Fig.5 we see that antisolitons at the corresponding initial velocities cannot penetrate regions with low density and are reflected in the same way as light quanta. The red antisoliton is reflected from both circular regions. This behavior of negative perturbations of the medium (localized regions of lower density) is in good agreement with the general properties of solitons, which are known to repel as elastic solids. Having a computer program, we can easily investigate the trajectories of solitary waves under any initial conditions.

V. CONCLUSIONS

Thus, the paper considers the modeling of localized soliton-like perturbations in media whose characteristics are described by equations such as mile water. The specificity of the approach used here to study the trajectories of the corresponding perturbations is the assumption of the exact solutions of the corresponding

systems of equations and the use of the approximate approach.

As a result of using the method of T-representations, a system of differential equations is obtained, from which functions are obtained that describe the trajectories of localized waves. The system is solved using the Mathcad environment. It is shown that the corresponding software package is effective for cases when function compositions are used.

It is shown that the corresponding software package is effective for cases when function compositions are used. Solutions for different cases of surface density are found. It is shown that there are only antisolitons in the medium that are reflected from voids like light quanta, although the laws of reflection are essentially nonlinear. Theoretical analysis has shown that solitons occur in precipitation when the gas is in a state of ionized plasma. The obtained results correlate well with experimental studies, which confirms the adequacy of the applied approach to modeling and the possibility of using it for the development of wave monitoring software.

REFERENCES

- [1] V. I. Petviashvili, and O. A. Pokhotelov. Solitary waves in plasmas and in the atmosphere. London : Routledge, 2016. doi:10.4324/9781315075556.
- [2] S. Basak, R. Dutta, and P. S. Kar. A new model with solitary waves: solution, stability and quasinormal modes. *Eur. Phys. J. Plus.* 2021. Vol. 136. 618. Doi:10.1140/epjp/s13360-021-01544-3
- [3] T. Asselmeyer-Maluga, and J. Kró. Dark Matter as gravitational solitons in the weak field limit. *Universe.* 2020. Vol. 6(12). 234. Doi: 10.3390/universe6120234
- [4] L. A. Ureña-López. Brief review on scalar field dark matter models. *Front. Astron. Space Sci.* 2019. Vol. 6. Pp. 1–13. Doi:10.3389/Fspas.2019.00047.
- [5] E. W. Mielke. Soliton model of dark matter and natural inflation. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. Vol. 1208. 012012. Doi:10.1088/1742-6596/1208/1/012012.
- [6] D. Bazeia, E. Belendryasova, and V. A. Gani. Scattering of kinks of the sinh-deformed ϕ^4 model. *Eur. Phys. J. C.* 2018. Vol. 78. 340. Doi: 10.1140/epjc/s10052-018-5815-z.
- [7] A. R. Gomes, F. C. Simas, K. Z. Nobrega et al. False vacuum decay in kink scattering. *J. High Energ. Phys.* 2018. Vol. 2018. 192. Doi: 10.1007/JHEP10(2018)192
- [8] D. Bazeia, A.R. Gomes, K.Z. Nobrega, and F.C. Simas. Kink scattering in a hybrid model. *Phys. Lett. B.* 2019. Vol. 793. Pp. 26–32. Doi: 10.1016/j.physletb.2019.04.013
- [9] P. Dorey, and T. Romanczukiewicz. Resonant kink–antikink scattering through quasinormal modes. *Phys. Lett. B.* Vol. 779. Pp. 117–123. Doi: 10.1016/j.physletb.2018.02.003
- [10] P. D. Roy, J. Das, and S. Kar. Quasi-normal modes in a symmetric triangular barrier. *Eur. Phys. J. Plus.* 2019. Vol. 134. 571. Doi: 10.1140/epjp/i2019-12928-y
- [11] P. D. Roy, S. Aneesh, and S. Kar. Revisiting a family of wormholes: geometry, matter, scalar quasinormal modes and echoes. *Eur. Phys. J. C.* 2020. Vol. 80. 850. Doi: 10.1140/epjc/s10052-020-8409-5
- [12] Y. Turbal, M. Turbal, A. Bomba, and A. Sokh. T-transformation method for studying the multi-solitone solutions of the Korteweg-de Vries type equations. *Journal of Mathematics and System Science.* 2015. Vol. 4. Pp. 164–169. Doi: 10.17265/2159-5291/2015.07.001.
- [13] N. Bila, E. Mansfield, and P. Clarkson. Symmetry group analysis of the shallow water and semi-geostrophic equations. *Q. J. Mech. Appl. Math.* 2006. Vol. 59. Pp. 95–123.
- [14] A. Y. Bomba, and Y. V. Turbal. Data Analysis Method and Problems of Identification of Trajectories of Solitary Waves. *Journal of Automation and Information Sciences.* 2015. Vol. 47. Pp. 13–23. Doi: 10.1615/JAutomatInfScien.v47.i10.20
- [15] Y. Turbal, M. Turbal, A. Bomba, O. Radoveniuk. Method of Earthquake Prediction Based on the Soliton Mechanisms of Some Shocks. *Journal of Environmental Science and Engineering.* 2014. Vol. 3. Pp. 151–155.

Spatial analysis of methane emissions from swine enteric fermentation in Ukraine

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.028>

Orysia Yashchun

International Institute for Applied Systems Analysis
Laxenburg, Austria
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Zoriana Romanchuk

International Institute for Applied Systems Analysis
Laxenburg, Austria
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Sofiia Hladun

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Sofiia Kharyton

Lviv Polytechnic National University,
Lviv, Ukraine

Rostyslav Bun

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
WSB University, Dąbrowa Górnicza, Poland

Oleksandr Kiselov

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Abstract—Anthropogenic factors are increasingly influencing the climate of our planet and are harmful to the environment. To control the environmental state, it is essential to conduct an inventory of greenhouse gases, analyze the spatial distribution of emission sources, and constantly monitor the amount. Since swine farming is one of most efficient Ukraine's livestock industries, this study is dedicated to calculating methane emissions from swine enteric fermentation and determining their spatial distribution.

Keywords—methane emission; climate change; swine; enteric fermentation.

I. INTRODUCTION

Nowadays, we can observe how due to negligent and destructive human activity the biosphere of our planet is in a state where global catastrophe is just a few steps away. Climate change caused by anthropogenic factors, is considered the main environmental problem of our time. Large-scale melting of glaciers, rising sea levels, changes in the length of the growing season, an increase in average rainfall, extreme drought, and many other things are the consequences of the large accumulation of greenhouse gases in the Earth's atmosphere. Hence, the issue of climate change is becoming increasingly acute. Reducing greenhouse gas emissions requires significant efforts and research at the international, national, and local levels. Thus, scientists are paying more and more attention to this problem and conducting an inventory of emissions and their spatial analysis.

II. SPATIAL MODELING EMISSION PROCESSES

According to [1] the share of the agricultural sector in total Ukrainian GHG emissions without LULUCF was 13.2% in 2020, where enteric fermentation products played a dominant role. Methane is produced in herbivores as a by-product of enteric fermentation, a digestive process by which carbohydrates are broken down by micro-organisms into simple molecules for

absorption into the bloodstream [2]. In general, farm animals including cattle, sheep, swine, and others are typically listed in this type of inventory. Therefore, this study focuses on the spatial analysis of emissions from swine enteric methane emissions.

Estimation of GHG emissions from the vital activity of swine was performed in accordance with the Tier 1 methodology from 2006 IPCC Guidelines [2] using the following basic equation $E = EF_t \times N_t / 10^6$, where E is the methane emissions from enteric fermentation, kt CH₄ yr⁻¹; N_t is the number of head of livestock species/category t in the country, the number of swine in our case; EF_t is the emission factor for the defined livestock population, kg CH₄ head⁻¹ yr⁻¹, $EF_t = 1.5$ kg CH₄ head⁻¹ yr⁻¹ for swine according to IPCC methodology [2].

Further disaggregation of the data obtained using the base equation was performed relying on certain assumptions. Since the State Statistics Service of Ukraine provides information on livestock at the regional level, total emissions were estimated for each region separately.

First, for each year under analysis, the largest agricultural enterprises engaged in swine breeding were identified (122 such pig farms in 2018), and then the corresponding emission amounts were assigned to them. Such objects were specified as point sources (Fig. 1, emissions from enterprises). It was assumed that emissions from keeping swine in households were geographically distributed within rural areas. The World Settlement Footprint (WSF) 2015 map [3] with a resolution of 10 m and a vector layer of Ukrainian village boundaries were used to identify such sources. The livestock population, which was not disaggregated in the previous steps, was distributed in proportion to the area of vectorized pixels of class 10 (grassland) of the MODIS Land Cover Type (MCD12Q1) dataset [4] available at an annual frequency and resolution of 500m. These features (Fig. 1, emissions from private farms), as

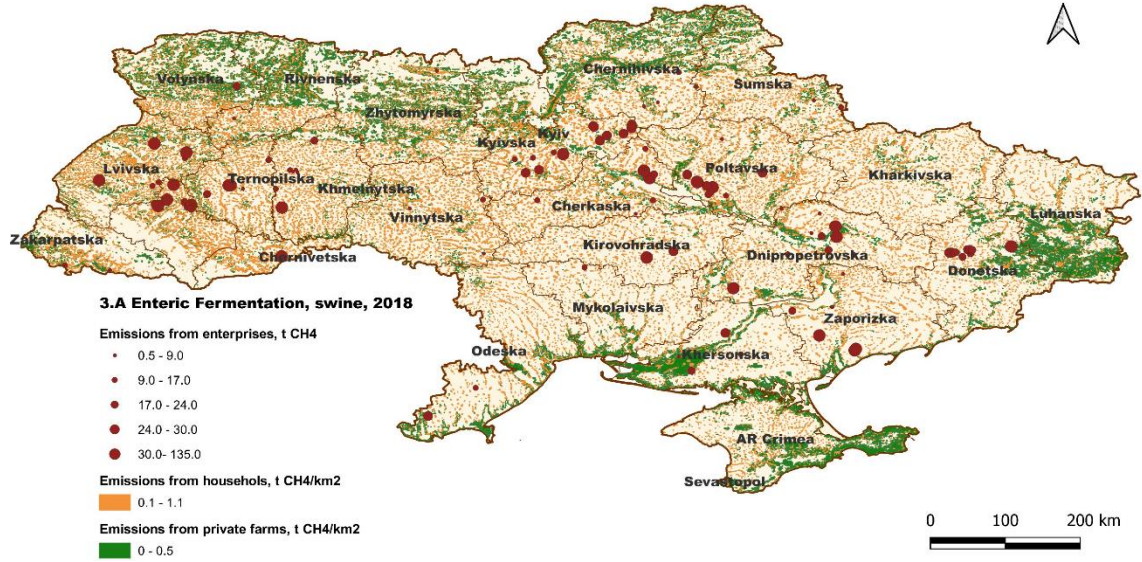


Figure 1. Spatial distribution of methane emissions from swine enteric fermentation in 2018

well as objects derived from WSF (Fig. 1, emissions from households), were defined as the polygon emission sources.

Thus, the following emission disaggregation factors for the polygon emission sources of administrative region r were obtained:

$$x(x_{r,i}) = \frac{\text{area}(x_{r,i})}{\sum_{j=1}^{n_r} \text{area}(x_{r,j})}, \quad (1)$$

where $x_{r,i}$ is the i -th element of region r ; n_r is the number of emission sources in the region r .

Hence, the estimation of GHG emissions from the vital activity of swine was carried out according to the following mathematical model:

$$E^{CH_4} = \sum_{i=1}^n E_i + \sum_r \sum_{j=1}^{n_r} x(h_{r,j}) E_{h,r} + \sum_r \sum_{j=1}^{n_r} x(f_{r,j}) E_{f,r}, \quad (2)$$

where E^{CH_4} is the annual total methane emissions from enteric fermentation; E_i is the emissions calculated using the basic formula for the i -th enterprise; $x(h_{r,j})$ and $x(f_{r,j})$ are the disaggregation coefficients for the j -th distribution object of emissions produced in the r -th region as a result of the activities of households (h) and private farms (f), respectively; $E_{h,r}$ and $E_{f,r}$ are the total emissions caused by keeping animals in households and private farms in the r -th region, respectively. Similar calculations were conducted for 2010, 2015-2021. The comparative histogram of emissions for the corresponding years is given in Fig. 2.

III. CONCLUSIONS

All significant negative impacts on the environment are destructive. Therefore, it is time to act in order to improve and normalize the current environmental state. The spatial distribution of greenhouse gas emissions is

important for the determination of the geographical characteristics of the emission sources, the calculation of

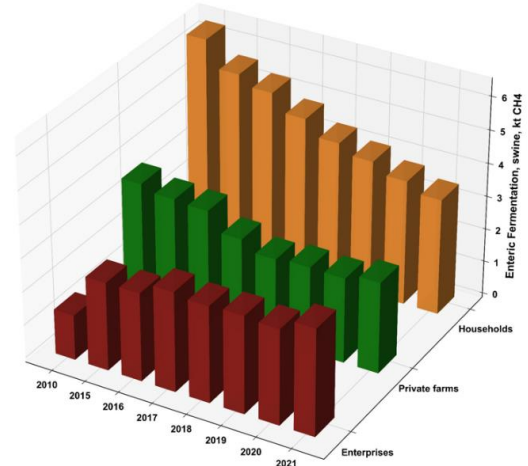


Figure 2. Comparative histogram of methane emission values from swine enteric fermentation

their amounts, and further analysis. That is why, in the context of this study, vector digital maps of the distribution of methane emissions from swine enteric fermentation in Ukraine for 2010, 2015-2022 were generated in accordance with the IPCC methodology [2].

REFERENCES

- [1] National Coordination Agency. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2023. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2023.
- [2] Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. *Industrial Processes and Product Use*. Japan : Institute for Global Environmental Strategies, 2006. Vol. 3.
- [3] M. Marconcini, A. Metz-Marconcini, S. Üreyen, D. Palacios-Lopez, W. Hanke et al. Outlining where humans live, the World Settlement Footprint 2015. *Scientific Data*. 2020. Vol. 7. Pp. 1-14.
- [4] C. O. Justice, J.R.G Townshend, E. F. Vermote et al. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sens. Environ*. 2002. Vol. 83(1-2). Pp. 3-15.

Features of Using Models Pspice Software

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.029>

Vasyl Zaiats

Department of Telecommunication and Computer Science
Polytechnika Bydgoska (PBS)
Bydgoszcz, Poland
zvmvz01@gmail.com

Abstract—The paper notes the features of the input language of this software package, methods of describing sentences of the input language, building own models of the studied object and using the models specified in the open library of this complex. Possible operating modes of the complex and methods of their effective use are described. The results obtained make it possible to carry out effective circuit and technical modeling and analysis of both known objects and newly created ones, while ensuring the economy of material and human resources.

Keywords—model; computer simulation; control directives; nonlinear signals; programming language; Pspice software packages.

I. INTRODUCTION

In the analysis of dynamic processes of complex nature, it is advisable to use the discrete models, approaches to the construction of which are described in [1–4; 8–14].

When creating new real devices, studying unexplored physical or natural phenomena, building recognition and identification systems that have the desired characteristics of the information signal or unknown characteristics to be studied, it is advisable to conduct analytical or computer modeling and analysis, creating adequate mathematical models for project being developed or studied. This approach requires much less time and technical resources compared to physical or field experiment, especially at the preliminary stage of model development or analysis of a complex structured process in the absence of reliable a priori information about the environment and behavior of objects in it.

Recently, discrete models of systems [3; 4] are widely used in nonlinear dynamics, for which discreteness is inherent in the nature of the object of study, and is not a consequence of discretization of a continuous system.

The following features explain the expediency of using discrete models:

- simplicity of mathematical description in comparison with continuous models;
- the presence of a significantly wider range of dynamic modes compared to known models;
- infinite dimensionality, which allows to model each new harmonic of the process by introducing it into the

vector of state variables, while for continuous systems to solve this problem it is necessary to increase the dimension of the system;

- no need to determine the sampling step, assess the local and global errors of numerical methods, areas of stability and synchronization;
- convenience and better adaptability to the computer experiment compared to continuous models;
- the ability to predict the behavior of an object or phenomenon in the future based on incomplete input data.

There are a large number of specialized computer-aided design (CAD) systems designed for modeling simple and complex electronic circuits. Among them, the CAD software OrCAD should be especially noted, which allows the analysis of transient processes in digital and analog electronic circuits at the stage of their design, as well as their time, amplitude-frequency and phase-frequency characteristics. Schematic CAD can analyze the sensitivity of the circuit (reaction to small changes in the input signal and circuit elements), signal spectra in any nodes of the circuit and obtain information about other important features of the simulated electronic circuit. Another important distinguishing feature of circuit engineering CAD is that they have huge libraries of various electronic components, which greatly simplifies their use during the design of real electronic circuits.

However, it is worth noting that the used means of schematic technical design also have a number of significant shortcomings, among which the following should be noted first of all:

- complexity of the mathematical description of models of electronic components that are being formed;
- complexity of library development (existing component libraries do not always suit designers);
- lack of a systematic approach to the description of models of electronic components.

In general, usually all schematic technical CAD projects are descriptive in nature and the possibilities of using a hierarchical approach and modern modular programming tools in them are extremely limited. All component models, due to the lack of

mathematical blocks in schematic CAD, are described declaratively using linguistic programming tools, and modern visual programming tools are used only to form electronic circuit models from component models. These shortcomings make it somewhat difficult to describe complex electronic circuits and systems using modern schematic CAD tools.

Among the systems designed for schematic modeling of electronic devices, Pspice (OrCAD), Micro-Cap, Multisim (Electronics Workbench) (National Instruments Corporation), DIgSILENT PowerFactory [5-7] and SIMULINK (MathWorks) [12] program packages should be highlighted.

Discrete models are applicable both to the construction of devices with the desired modes and to the recognition and identification of situations in systems with complex dynamics and behavior.

The simplest and most convenient for the analysis of discrete models is a set of programs Pspice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [11-14], which allows you to analyze them by relatively simple means, preserving the qualitative features of the process and in the first approximation to obtain analytical estimates to predict its behavior. This work is devoted to the description of the input language and features of using the Pspice software package.

II. PSPICE INPUT LANGUAGE

Pspice software is designed to model analog, digital and analog-digital devices and identify the parameters of the models of the studied objects. Pspice input language is quite simple and easy to use [5, 12-14]. Compiling a task for execution begins with assigning names to the nodes of the schematic diagram, which can be integers from 0 to 9999 or alphanumeric characters. References to alphanumeric nodes are made in square brackets.

When you create a task, you specify an arbitrary file name that has a .CIR extension by default. The first taskbar is the title, which is then displayed in the source file (contains any text without Cyrillic). The comment is placed in "« ". Any text in the ribbon after ";" perceived as a comment. The task ends with the .END directive. The order in which the task bars are entered does not matter. The + character in the first position is used to continue a line in another line.

Pspice does not distinguish between uppercase and lowercase letters. Commas, sign equals, spaces are equivalent. You can describe several simulation tasks in one task, thus saving time on running each of the tasks. Compilation of the problem begins with the numbering of nodes and an arbitrary description of all elements of the schematic.

All sentences in the input language are divided into component descriptions and task management directives. The structure of the description of the components is as follows:

<component name>, *<number of two or more nodes>*,
<model name>, *<numerical data>*

The component name consists of a sequence of Latin characters and numbers up to 133 characters long (8 characters recommended). The first character of the component name - the letters of the Latin alphabet from A to Z. The first character of the name determines the type of component:

B – helium arsenide field-effect transistor with n-type channel;

- C – capacitor;
- D – diode;
- E – voltage source, voltage controlled;
- F – current source controlled by current;
- G – voltage-controlled current source;
- H – voltage source controlled by current;
- I – independent current source;
- J – field-effect transistor with controlled p-n junction;
- K is the mutual inductance or magnetic core transformer;
- L – inductance;
- M – MOSFET – transistor;
- N – analog-to-digital converter;
- O – digital-to-analog converter;
- Q – bipolar transistor;
- R – resistor;
- S – voltage-controlled switch;
- T – delay line;
- V – independent voltage source;
- W – voltage-controlled switch;
- U – digital device;
- X – macro model.

Node numbers must follow in a specific order for each component. The component model name is optional. It is specified when creating your own model or using an existing one. Then following the numerical values of the component parameters. Scaling numbers is done with suffixes:

- $F = 10^{-15}$;
- $P = 10^{-12}$;
- $N = 10^{-9}$;
- $U = 10^{-6}$;
- $M = 10^{-3}$;
- $K = 10^3$;
- $MEG = 10^6$;
- $G = 10^9$;
- $T = 10^{12}$

Component parameters are specified in two ways: directly in the sentence of the input file or using the .MODEL directive, which has the following structure:

.MODEL <model name>, <type name>, <parameter name = value>, <permissible parameter scatter>

The component type is defined as follows:

- RES- resistor*
- CAP-capacitor*
- IND-inductance*
- D-diode*
- NPN-bipolar n-p-n transistor*
- PNP-bipolar p-n-p transistor*
- UDLY - digital delay line*

The .MODEL directive specifies in parentheses a list of model parameter values:

.MODEL RM RES (R=1.5 , TC1=0.2,TC2=0.05)
.MODEL CK CAP(C=1 , DEV= 0.1)

The description of the model is realized in two sentences:

RM2 (R=0.5 TR1=0.05 TR2=0.02)

where the nonlinear resistance is calculated according to the formula:

$$RM2 = R \cdot (1 + TR1 \cdot (T - T0) + TR2 \cdot (T - T0)) \cdot (T - T0)$$

Quite similarly set by the value of nonlinear inductance and capacity.

When analyzing transients, you can specify a set of nonlinear time functions, the behavior of which is shown in Fig. 1-3. By varying the parameters of these functions, you can simulate signals of different shapes and durations, using the following names:

- EXP*(y₁, y₂, t₁, t₂, t₃) – exponential function;
- PULSE*(y₁, y₂, t₁, t₂, t₃, t, T) – impulse function;
- SIN*(y₀, y_u, f, t₁, d, φ) – harmonic function.

Note that setting a value of the parameter d other than zero in the harmonic function can simulate a vanishing sine wave or cosine.

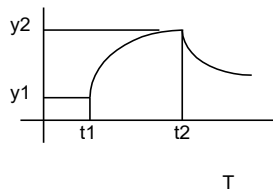


Figure 1. Example of exponential function

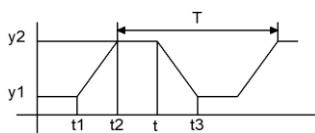


Figure 2. Example of impulse function

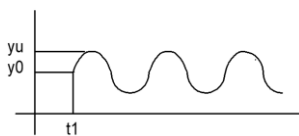


Figure 3. Example of harmonic function

To model the dependent current and voltage sources, the polynomial function POLY is used, which is approximated by the expression:

$$Y = P_0 + P_1 X_1 + P_2 X_2 + \dots + P_N X_N + P_{N+1} X_1^2 + P_{N+2} X_1 X_2 + \dots + P_{N+N} X_1 X_N + P_{2N+1} X_2^2 + \dots + P_{2N+N-1} X_2 X_N + \dots$$

At the N = 1

$$Y = f(X_1) = P_0 + P_1 X_1 + P_2 X_1^2 + \dots$$

At the N = 2

$$Y = f(X_1, X_2) = P_0 + P_1 X_1 + P_2 X_2 + P_3 X_1^2 + P_4 X_1 X_2 + P_5 X_2^2 + \dots$$

At the N = 3

$$Y = f(X_1, X_2, X_3) = P_0 + P_1 X_1 + P_2 X_2 + P_3 X_3 + P_4 X_1^2 + P_5 X_1 X_2 + P_6 X_1 X_3 + P_7 X_2^2 + P_8 X_2 X_3 + P_9 X_3^2 + P_{10} X_1^3 + P_{11} X_1^2 X_2 + P_{12} X_1^2 X_3 + P_{13} X_1 X_2^2 + P_{14} X_1 X_2 X_3 + P_{15} X_1 X_3^2 + P_{16} X_2^3 + P_{17} X_2^2 X_3 + P_{18} X_2 X_3^2 + P_{19} X_3^3$$

This function can be applied to the construction of systems for modulation, in particular, to the analysis of amplitude and phase-modulated oscillations.

III. BASIC TASK MANAGEMENT DIRECTIVES IN THE PSPICE ENVIRONMENT

The main task management directives in the Pspice environment allow you to perform 9 types of analysis:

- 1) analysis of the DC circuit;
- 2) multivariate analysis when changing the parameters of the scheme;
- 3) sensitivity of circuit characteristics to changes in parameters;
- 4) calculation of transient functions;
- 5) frequency characteristics of the linearized circuit;
- 6) spectral densities of internal noise;
- 7) calculation of transient characteristics;
- 8) spectral analysis;
- 9) static analysis by the Monte Carlo method.

The first mode is always implemented without any directives and a map of nodal potentials is issued. The .DP directive is used for complete information.

Multivariate analysis at the variation of a variable or several variables has the form:

.DC <name of first change >, <start value> <finish value>, <value of increment >, ..., <name of finish change >, <start value>, <finish value> < value of increment >

The sensitivity of the characteristics is calculated according to the directive:

.SENS < output variables >.

Let's say if the circuits consist of R1, R2, G3 and we have a record:

.SENS V(g), V(r).

then the values of dV (g) / dR1, dV (r) / dR1, dV (g) / dR2, dV (r) / dR2, dV (g) / dG3, dV (r) / dG3 will be calculated.

The .TF <output variable> <voltage or current source name> directive is used to calculate the transfer functions. For example, when calling the .TF V (5) VIN directive, the result will be:

dV(5)/dVIN.

Frequency characteristics are calculated according to the directive:

.AC <h> <start frequency> <end frequency>.

The results are output according to the .PRINT or .PROBE directive.

A directive is used to calculate transients:

`.TRAN <output step> <end time> <start time>
<maximum calculation step> .UIC.`

If the maximum output step is not specified, it is automatically selected as `<end time> / 50`.

Before the calculation of transients, the calculation of direct current. The UIC parameter is used to cancel this mode.

But then it is necessary to set the initial conditions on the reactive elements. Example:

`C1 3 4 100Φ IC=0.5.`

The result of the analysis is displayed in the form of a table when using the `.PRINT`, `.PROBE` or `PLOT` directives. There are a number of additional directives [5; 6] for ease of operation in the Pspice environment

IV. CONCLUSION

The paper describes features the application and functionality of the basic version of the Pspice software package, its input language, ways to specify sentences in working files, use management directives, build your own models and use models of existing software in your own library. Note that the set of Pspice programs is open and can be replenished with new models when creating and writing to the library.

These specific examples of the description and analysis of nonlinear signals, generator circuits and non-linear power supplies can be effectively used both in the analysis of similar processes and in the development of own models of objects.

The results presented in the work can be used both in the course of research and in the development of the software complex Pspice [5; 12; 14] and will be useful when using other software products [5-7] for modeling and developing automated design systems for radio electronic devices and their modes of operation.

Thus, attention is paid to the basic version of Pspice because the description of the models themselves in modern software complexes is often linguistic in nature, which complicates their effective application and modification.

REFERENCES

- [1] V.M. Zaiats. Constraction and analises of model discrete oscillation systems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2000. Vol. 2. Pp. 161–165.
- [2] V.M. Zaiats. The Models Descrete Oscillation Systems. *Computer Tegnology of Print*. 2011. Pp. 37–39.
- [3] V. M. Zaiats. Methods, Algorithms and Software for Simulation and Analysis of the Dynamics of Complex Objects and Systems Based on Discrete Models. Lviv : New World, 2009.
- [4] S. F. Sharkovsky, A. G. Kolyada, V. V. Sivak, and A. N. Fedorenko. Dynamics of one-dimensional mappings. Kyiv : Ukraine, 1989. 216 p.
- [5] “DIgSILENT PowerFactory. Version 14.0,” Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2011.
- [6] Power System Solutions – DIgSILENT. [Online]. URL: <http://www.digsilent.de>. (Accessed: October 22, 2023).
- [7] “DMCC Engineering.” [Online]. URL: <http://dmcc.com.ua/>. (Accessed: October 22, 2023).
- [8] J. Vlach and K. Singhall, “Computer Methods for Circuit Analysis and Design,” New York : VNRC, 1980.
- [9] L. Feldman, A. Petrenko and O. Dmitrieva, “Numerical Methods in informatic,” Kiev: BHV, 2006.
- [10] G. Holl and J.M. Watt, “Modern Numerical Methods for Ordinary Differential Equations,” Oxford : Clarendon press, 1979.
- [11] “MicroSim PSpice A/D & Basics+,” Irvine: MicroSim Corporation, 2012.
- [12] V. Zaiats, “Methods and means of computer information technologies in applied applications,” Lviv : Ukrainian technologies, 2017.
- [13] V.M. Zaiats, “Elements of the Theory Information Technology in Applied Applications,” Rivne: National University of Water and Enviromental Engineering, 2023.
- [14] V. M. Zaiats, J. Majeviskyi, and M.M. Zaiats. Features and functionality of the software complex Pspice. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. 2021. Vol. 42. Pp. 50–57. DOI: 10.336910/67751-2524-0560-2021-42-48.

Узагальнена розв'язність псевдопараболічних інтегро-диференціальних рівнянь

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.030>

Андрій Анікушин

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики
КНУ імені Тараса Шевченка
м. Київ, Україна
anik_andrii@ukr.net

Анастасія Андарал

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики
КНУ імені Тараса Шевченка
м. Київ, Україна

Анотація—У роботі використовується метод апіорних нерівностей в негативних нормах для доведення коректності постановки початково-крайової задачі Діріхле для інтегро-диференціального рівняння псевдопараболічного типу з інтегральними доданками типу Вольєрра.

Ключові слова—задача Діріхле; інтегро-диференціальне рівняння; оператор Вольєрра; апіорні оцінки; узагальнені розв'язки.

I. ВСТУП

Псевдопараболічні диференціальні рівняння виникають при дослідженнях фільтрації рідини та газу в пористих середовищах та середовищах "з тріщинами", теплопровідності в неоднорідних середовищах, міграції іонів у ґрунті, розповсюдження хвиль в дисперсному середовищі та в тонкому еластичному склі, тощо [1].

Багато результатів щодо коректності постановок, оптимального керування та керованості процесами, що описуються рівняннями псевдопараболічного типу було отримано С.І. Ляшком за допомогою методики апіорних нерівностей в негативних нормах (див., наприклад, [1], [2] та наведену там бібліографію).

Основні положення теорії апіорних нерівностей в негативних нормах та деякі її застосування описано у класичній монографії [1]. Підхід розроблений С.І. Ляшком та його учнями виявився досить ефективним для дослідження різноманітних питань коректності постановок, оптимального керування, керованості систем з розподіленими параметрами. Зокрема, і до задач Діріхле для інтегро-диференціальних рівнянь з інтегральними доданками типу Вольєрра [3],[4],[5].

У нашій роботі ми доводимо апіорні нерівності для задачі Діріхле для псевдопараболічного рівняння

$$\mathcal{L}u \equiv L_D u + L_1 u = f(x, t), \quad (1)$$

з однорідними умовами

$$u|_{t=0} = 0, \quad u|_{x \in \partial \Omega} = 0. \quad (2)$$

Тут

$$L_D u \equiv (Au)_t + Bu,$$

$$L_1 u \equiv \int_0^t \sum_{i=1}^n (K_i(x, t, \tau) u_{x_i}(x, \tau))_{x_i} d\tau,$$

та

$$Au \equiv - \sum_{i,j=1}^n (a_{ij}(x) u_{x_j})_{x_i} + a(x)u,$$

$$Bu \equiv - \sum_{i,j=1}^n (b_{ij}(x) u_{x_j})_{x_i} + b(x)u.$$

Тим самим, ми розширюємо клас рівнянь, до яких може бути застосовано цитований вище метод. На основі цих нерівностей ми обґрунтуємо коректність постановки початково-крайової задачі та наводимо відповідні теореми про існування та єдиність узагальнених розв'язків.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо циліндричну область $Q = \Omega \times (0, T)$, де Ω – обмежена область в \mathbb{R}^n з гладкою межею $\partial \Omega$, та лінійне рівняння (1) з інтегро-диференціальним оператором. При цьому $u(x, t)$ – шукана функція, що описує стан системи в області Q .

Надалі будемо вважати, що $\{a_{ij}\}_{i,j=1}^n, \{b_{ij}\}_{i,j=1}^n \in C^1(\overline{\Omega}), a, b \in C(\overline{\Omega})$, для всіх $x \in \Omega$ мають місце співвідношення

$$a_{ij}(x) = a_{ji}(x), b_{ij}(x) = b_{ji}(x), a(x) \geq 0, b(x) \geq 0,$$

та, що коефіцієнти $a_{ij}(x)$ та $b_{ij}(x)$ при довільних $\xi_i \in \mathbb{R}, i = \overline{1, n}$ та $x \in \overline{\Omega}$ задовольняють умовам

$$\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \xi_i \xi_j \geq \alpha \sum_{i=1}^n \xi_i^2, \quad \sum_{i,j=1}^n b_{ij}(x) \xi_i \xi_j \geq 0$$

для деякої додатної сталої α .

Вважатимемо також, що ядра $K_i(x, t, \tau)$ є неперервно-диференційовними. Зокрема, для деякої сталої M справджується нерівність $|K_i(x, t, \tau)| < M$ для всіх $x \in \Omega$ та $t, \tau \in [0, T]$.

Областю визначення оператора \mathcal{L} вважатимемо простір, що складається з множини нескінченну кількість разів диференційовних в області \bar{Q} функцій, що задовольняють однорідним початковим та граничним умовам типу Діріхле (2). Таку множину будемо позначати C_{BR}^{∞} .

Розглянемо простір W_{BR}^+ , що є поповненням C_{BR}^{∞} за нормою

$$\|u\|_{W_{BR}^+} = \left(\int_Q u_t^2 + \sum_{i=1}^n u_{x_i t}^2 dQ \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Також розглянемо спряжений оператор \mathcal{L}^*v . Його область визначення вважаємо простір, який складається з множини гладких в області \bar{Q} функцій, що задовольняють початковим та граничним умовам

$$v|_{t=T} = 0, \quad v|_{x \in \partial\Omega} = 0. \quad (4)$$

Через W_{BR}^+ позначимо поповнення множини C_{BR}^{∞} за тією ж нормою (3).

Розглянемо негативні простори W_{BR}^-, W_{BR}^{+} , що побудовано за позитивними просторами W_{BR}^+, W_{BR}^+ , відповідно, відносно $L_2(Q)$.

Через H_{BR}^+ позначимо поповнення простору гладких функцій в області \bar{Q} , що задовольняють початковим та граничним умовам (2) за нормою

$$\|u\|_{H_{BR}^+}^2 = \int_Q (u^2 + \sum_{i=1}^n u_{x_i}^2) dQ. \quad (5)$$

Простір H_{BR}^+ – поповнення простору гладких функцій в області \bar{Q} , що задовольняють початковим та граничним умовам (4) за нормою (5). Через H_{BR}^-, H_{BR}^- позначимо відповідні негативні простори.

III. АПІОРНІ НЕРІВНОСТІ

Лема 1. Існує така стала $C > 0$, що нерівність $C \|u\|_{W_{BR}^+} \geq \|\mathcal{L}u\|_{W_{BR}^-}$ виконується для довільної гладкої функції $u(x, t) \in W_{BR}^+$, а для довільної гладкої функції $v(x, t) \in W_{BR}^+$ виконується нерівність $C \|v\|_{W_{BR}^+} \geq \|\mathcal{L}^*v\|_{W_{BR}^-}$.

Лема 2. Існує така стала $C > 0$, що нерівність $C \|u\|_{W_{BR}^+} \geq \|\mathcal{L}u\|_{W_{BR}^-}$ виконується для довільної функції $u(x, t) \in W_{BR}^+$, а для довільної функції $v(x, t) \in W_{BR}^+$ виконується $\|\mathcal{L}^*v\|_{W_{BR}^-} \geq C \|v\|_{H_{BR}^+}$.

Таким чином для операторів $\mathcal{L}, \mathcal{L}^*$ мають місце апіорні нерівності

$$C_1 \|u\|_{H_{BR}^+} \leq \|\mathcal{L}u\|_{W_{BR}^-} \leq C_2 \|u\|_{W_{BR}^+}, \quad (6)$$

$$C_1 \|v\|_{H_{BR}^+} \leq \|\mathcal{L}^*v\|_{W_{BR}^-} \leq C_2 \|v\|_{W_{BR}^+} \quad (7)$$

для довільних $u \in W_{BR}^+, v \in W_{BR}^+$.

IV. УЗАГАЛЬНЕНА РОЗВ'ЯЗНІСТЬ

Розглянемо задачу

$$\mathcal{L}u = f, \quad f \in W_{BR}^-. \quad (8)$$

Її розв'язки будемо розуміти в сенсі таких означень

Означення 1. Узагальненим (слабким) розв'язком задачі з правою частиною $f \in W_{BR}^-$ називається така $u \in W_{BR}^+$, що рівність

$$(\mathcal{L}u, v)_{W_{BR}^+} = (f, v)_{W_{BR}^+}$$

виконується для будь-яких функцій $v \in W_{BR}^+$.

Означення 2. Узагальненим (слабким) розв'язком задачі з правою частиною $f \in W_{BR}^-$ називається така функція $u \in H_{BR}^+$, що для будь-яких функцій $v \in W_{BR}^+$ виконується рівність

$$(u, \mathcal{L}^*v)_{H_{BR}^+} = (f, v)_{W_{BR}^+}.$$

Грунтуючись на доведених апіорних нерівностях (6), (7) та, використовуючи результати роботи [1], можна сформулювати теореми узагальненої розв'язності.

Теорема 1. Для будь-якої функції $f \in H_{BR}^-$ існує єдиний розв'язок $u \in W_{BR}^+$ задачі (8) в сенсі означення 1. Причому, для деякої сталої C справедлива нерівність $\|u\|_{W_{BR}^+} \leq C \|f\|_{H_{BR}^-}$.

Теорема 2. Для будь-якої функції $f \in W_{BR}^-$ існує єдиний розв'язок $u \in H_{BR}^+$ задачі (8) в сенсі означення 2. Причому, для деякої сталої C справедлива нерівність $\|u\|_{H_{BR}^+} \leq C \|f\|_{W_{BR}^-}$.

Зауваження. Аналогічні означення та теореми можна сформулювати й для спряженої задачі.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] S. I. Lyashko. Generalized Optimal Control of Linear Systems with Distributed Parameters. Kluwer Academic Publishers, 2002. 455 p.
- [2] I. V. Sergienko, O. M. Khimich, D. A. Klyushin, V. I. Lyashko, S. I. Lyashko and V.V. Semenov. Formation and Development of the Scientific School of the Mathematical Theory of Filtration. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2023. Vol. 59. Pp. 61–70.
- [3] A. Anikushyn and O. Zhyvolovych. Generalized solvability and optimal control for an integro-differential equation of a hyperbolic type. *Modeling, Control and Information Technologies : Proceedings of International Scientific and Practical Conference*. 2021. № 5. Pp. 8–9.
- [4] A. Hulianytskyi and A. Anikushyn. Generalized solvability of parabolic integro-differential equations. *Differential Equations*. 2014. Vol.50 (1). Pp. 98–109.
- [5] A. V. Anikushyn. 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.

Усереднення в узагальненій багаточастотній системі із запізненням

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.031>

Ярослав Бігун

Кафедра прикладної математики
та інформаційних технологій
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича
м. Чернівці, Україна
y.bihun@chnu.edu.ua

Ігор Скутар

Кафедра прикладної математики
та інформаційних технологій
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича
м. Чернівці, Україна
i.skutar@chnu.edu.ua

Анотація—Розглянуто багаточастотну систему диференціальних рівнянь із лінійно перетвореними аргументами із різними степенями малого параметра. Побудовано усереднену систему рівнянь і одержано асимптотичну оцінку осциляційного інтеграла. Метод усереднення обґрунтовано з оцінкою також порядку. Наведено модельний приклад для ілюстрації одержаних результатів.

Ключові слова—метод усереднення; резонанс; малий параметр; лінійно перетворений аргумент; аргумент із запізненням.

Математичні моделі коливних систем із амплітудними $a \in \mathbb{D} \subset \mathbb{R}^n$ і фазовими $\varphi \in \mathbb{R}^m$ змінними у класичних працях із нелінійної механіки [1, 2] мають вигляд

$$\frac{da}{dt} = \varepsilon X(\tau, a, \varphi, \varepsilon), \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega(\tau, a) + \varepsilon Y(\tau, a, \varphi, \varepsilon), \quad (2)$$

де ε – малий додатний параметр, $\tau = \varepsilon t$ – “повільний час”, вектор-функції X і Y – періодичні, квазіперіодичні або майже періодичні за змінними $\varphi_1, \dots, \varphi_m$ і є степеневими розкладами за малим параметром. Такого вигляду системи рівнянь із запізненням аргументу досліджуються у багатьох працях, зокрема в [3-6].

Ефективним методом якісного дослідження і побудови наближеного розв’язку системи (1), (2) є усереднення за фазовими змінними φ_v при $\varepsilon = 0$. Отримана на кубі періодів система рівнянь має вигляд

$$\frac{d\bar{a}}{dt} = \varepsilon X_0(\tau, \bar{a}), \quad \frac{d\bar{\varphi}}{dt} = \omega(\tau, \bar{a}) + \varepsilon Y_0(\tau, \bar{a}),$$

і значно простіша, оскільки рівняння для амплітуд не залежить від фазових змінних.

У даній роботі розглядається задача із запізненням та малим параметром, який у рівняннях для амплітудних і фазових змінних може входити у різних степенях, не обов’язково цілих.

Розглядається система рівнянь із повільно змінними частотами вигляду

$$\frac{da}{d\tau} = \varepsilon^{\kappa_1} X(\tau, a_\Lambda, \varphi_\Theta), \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{\omega(\tau)}{\varepsilon^\kappa} + \varepsilon^{\kappa_2} Y(\tau, a_\Lambda, \varphi_\Theta), \quad (4)$$

де $\tau \in [0, L]$, $a \in \mathbb{D} \subset \mathbb{R}^n$, $\varphi \in \mathbb{R}^m$, $n, m \geq 1$; $\varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$, $a_\Lambda(\tau) = (a(\lambda_1 \tau), \dots, a(\lambda_p \tau))$, $0 < \lambda_1 < \dots < \lambda_p \leq 1$, $\varphi_\Theta(\tau) = (\varphi(\theta_1 \tau), \dots, \varphi(\theta_q \tau))$, $0 < \theta_1 < \dots < \theta_q \leq 1$. Сталі $\kappa > 0$, $\kappa_1 \geq 0$, $\kappa_2 \geq 0$. При $\kappa - 1 = \kappa_1 = \kappa_2$ одержимо m -частотну систему рівнянь стандартного вигляду [3].

Відповідна (3), (4) усереднена за фазовими змінними система рівнянь набуває вигляду

$$\frac{d\bar{a}}{d\tau} = \varepsilon^{\kappa_1} X_0(\tau, \bar{a}_\Lambda), \quad \frac{d\bar{\varphi}}{d\tau} = \frac{\omega(\tau)}{\varepsilon^\kappa} + \varepsilon^{\kappa_2} Y_0(\tau, \bar{a}_\Lambda).$$

Якщо розв’язок $\bar{a} = \bar{a}(\tau)$ із першого рівняння із початковою або іншою умовою знайдено, то знаходження розв’язку $\bar{\varphi}(\tau, \varepsilon)$ зводиться до задачі інтегрування.

Для обґрунтування методу усереднення важливо встановити оцінку відповідного системі (3), (4) осциляційного інтеграла, який отримуємо після підстановки вираз $\varphi(\tau, \varepsilon)$ з інтегрального рівняння для $a(\tau, \varepsilon)$ в розклад вектор-функції $X(\tau, a_\Lambda, \varphi_\Theta)$ і набуває вигляду

$$I_k(\tau, \varepsilon) = \int_0^\tau X_k(\tau, a_\Lambda) \cdot \exp\left(\frac{1}{\varepsilon^\kappa} \int_0^s \gamma_k(z) dz\right) ds. \quad (5)$$

Тут $k = (k_1, \dots, k_q)$, $k_v \in \mathbb{Z}^m$, $k \neq 0$.

Функцією

$$\gamma_k(\tau) = \sum_{v=1}^q \theta_v(k_v, \omega(\theta_v \tau))$$

задається умова резонансу у системі (3), (4) в точці τ , яка має вигляд

$$\gamma_k(\tau) = 0, k \neq 0.$$

Якщо $q = \theta = 1$, то одержимо стандартну умову резонансу $(k, \omega(\tau)) = 0$, $k \neq 0$,

для багаточастотної системи диференціальних рівнянь без запізнення аргументу.

Ідея обґрунтування методу усереднення на підставі оцінки відповідного осциляційного інтеграла належить А.М. Самойленку і розвинута у монографії [2] та в інших його працях з учнями.

Досліджено в роботі питання існування, єдиності та побудовано ефективну оцінку методу

усереднення на відрізку $[0, L]$ при досить малому значенні малого параметра $\varepsilon^* \in (0, \varepsilon_0]$.

Аналогічно як в [3], доведено оцінку для осциляційного інтеграла (5) вигляду

$$\|I_k(\tau, \varepsilon)\| \leq c\varepsilon^\alpha \left(\sup_{D_1} \|X_k(\tau, a_\Lambda)\| + \frac{1}{\|k\|_\Theta} \sup_{D_1} \left\| \frac{dX_k(\tau, a_\Lambda)}{d\tau} \right\| \right),$$

де $\alpha = \kappa/mq$, $\|k\|_\Theta = \sum_{v=1}^q \theta_v \|k_v\|$, $D_1 = D^p \times (0, \varepsilon_0]$. Важливо, що одержана оцінка рівномірна відносно k і не залежить від ε .

Теорема. Нехай вектор-функції X , Y і ω неперервно диференційовані за всіма змінними до порядку mq , визначник Вронського за системою функцій $\{\omega(\theta_1\tau), \dots, \omega(\theta_p\tau)\}$ відмінний від нуля на $[0, L]$, існує розв'язок усередненої задачі і компонента $\bar{a}(\tau)$ лежить в \mathbb{D} разом із деяким околком.

Тоді для досить малого ε^* існує єдиний розв'язок системи рівнянь (3), (4), $a(0, \varepsilon) = \bar{a}(0)$ і $\varphi(0, \varepsilon) = \bar{\varphi}(0, \varepsilon)$, і для всіх $\tau \in [0, L]$, і кожного $\varepsilon \in (0, \varepsilon^*]$ виконується оцінка

$$\varepsilon^{\kappa_2} \|a(\tau; \bar{y}, \bar{\psi}, \varepsilon) - \bar{a}(\tau; \bar{y})\| + \varepsilon^{\kappa_1} \|\varphi(\tau; \bar{y}, \bar{\psi}, \varepsilon) - \bar{\varphi}(\tau; \bar{y}, \bar{\psi}, \varepsilon)\| \leq c_1 \varepsilon^{\alpha + \kappa_1 + \kappa_2},$$

де $c_1 > 0$ і не залежить від ε .

Моделльний приклад одночастотної системи

$$\frac{da}{d\tau} = \varepsilon^{\kappa_1} \cos(k\varphi + l\varphi_\theta), a(0, \varepsilon) = a_0, \quad (6)$$

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{1+2\tau}{\varepsilon^\kappa}, \varphi(0) = 0, \quad (7)$$

$$\varphi_\theta(\tau) = \varphi(\theta\tau), 0 < \theta < 1; k, l \in \mathbb{Z}; \kappa_1 \geq 0, \kappa > 0.$$

Усереднена задача

$$\frac{d\bar{a}}{d\tau} = 0, \bar{a}(\tau) = a_0.$$

Умова резонансу:

$$\gamma(\tau) = (k + l\theta) + 2\tau(k + \theta^2 l) = 0.$$

Умова незастрягання в околі резонансу виконується, оскільки

$$\left| \frac{1+2\tau}{2} - \frac{1+2\theta\tau}{2\theta} \right| = 2(\theta - 1) \neq 0.$$

Оскільки $\varphi(\tau, \varepsilon) = (1 + \tau)\tau/\varepsilon^\kappa$, то

$$k\varphi + l\varphi_\theta = \frac{\tau}{\varepsilon^\kappa} [(k + l\theta) + \tau(k + l\theta^2)].$$

Випадок резонансу: $k + l\theta = 0, \gamma(0) = 0$,

$$\begin{aligned} a(1, \varepsilon) - \bar{a}(1) &= \varepsilon^{\kappa_1} \int_0^1 \cos \frac{s^2 c_2}{\varepsilon^\kappa} ds = \\ &= \varepsilon^{\kappa_1} \left(\sqrt{\frac{\pi}{8c_2}} \varepsilon^{\frac{\kappa}{2}} + o(\varepsilon^{\frac{\kappa}{2}}) \right) = O\left(\varepsilon^{\kappa_1 + \frac{\kappa}{2}}\right), \\ c_2 &= k + l\theta^2. \end{aligned}$$

Нехай $\kappa - 1 = \kappa_1 = 0$, тоді $a(1, \varepsilon) - \bar{a}(1) = O(\sqrt{\varepsilon})$, що узгоджується з [3].

Для нерезонансної системи:

$$\begin{aligned} k + l\theta^2 &= 0, \quad \gamma(\tau) = k + l\theta \neq 0. \\ |a(\tau, \varepsilon) - \bar{a}(\tau)| &= \varepsilon^{\kappa_1} \left| \int_0^\tau \cos \frac{(k + l\theta)}{\varepsilon^\kappa} s ds \right| \leq \\ &\leq \varepsilon^{\kappa_1 + \kappa_1} / |k + l\theta| \quad \forall \tau \geq 0. \end{aligned}$$

Якщо $\kappa - 1 = \kappa_1 = 0$, то

$$|a(\tau, \varepsilon) - \bar{a}(\tau)| \leq \varepsilon / |k + l\theta|,$$

як у випадку одночастотної системи без запізнення.

Розглянемо систему (6), (7) із крайовими умовами

$$\beta_0 a(0, \varepsilon) + \beta_1 a(1, \varepsilon) = d, \varphi(0) = 0.$$

Усереднена задача

$$\frac{d\bar{a}}{d\tau} = 0, \beta_0 \bar{a}(0) + \beta_1 \bar{a}(1) = d,$$

$$\bar{a}(\tau) = \bar{y} = d / (\beta_0 + \beta_1).$$

Точний розв'язок

$$\begin{aligned} a(\tau, \varepsilon) &= \bar{y} + \mu + \varepsilon^{\kappa_1} \int_0^\tau \cos \frac{c_2 s^2}{\varepsilon^\kappa} ds, \\ \mu &= -\frac{\beta_0 \varepsilon^{\kappa_1}}{\beta_0 + \beta_1} \int_0^\tau \cos \frac{c_2 s^2}{\varepsilon^\kappa} ds, |\mu| \leq c_3 \varepsilon^{\kappa_1 + \frac{\kappa}{2}}. \end{aligned}$$

Похибка методу усереднення

$$\begin{aligned} |a(\tau, \varepsilon) - \bar{a}(\tau)| &\leq |\mu| + \\ &+ \varepsilon^{\kappa_1} \left| \frac{\beta_0}{\beta_0 + \beta_1} \right| \left| \int_0^\tau \cos \frac{c_2 s^2}{\varepsilon^\kappa} ds \right| \leq c_4 \varepsilon^{\kappa_1 + \frac{\kappa}{2}}. \end{aligned}$$

Отже, одержано нові оцінки методу усереднення для систем із запізненням і різними значеннями малого параметра у рівняннях для амплітудних і фазових змінних.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Yu. A. Mitropol'skii, A. M. Samoilenko, D. I. Martynyuk. Systems of Evolution Equations with Periodic and Quasiperiodic Coefficients. Dordrecht : Springer Dordrecht, 1993.
- [2] A. Samoilenko, R. Petryshyn. Multifrequency Oscillations of Nonlinear Systems. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [3] Ya. I. Bihun. On existence of solution and averaging for multipoint boundary-value problems for manyfrequency systems with linearly transformed argument. *Nonlinear oscillations*. 2008. № 11(4). С. 462–471.
- [4] Ya. I. Bihun, R. Petryshyn, I. Krasnokutska. Averaging method in multifrequency systems with linearly transformed arguments and with point and integral conditions. *Acta et Coomentationes, Exact and Natural Sciences*. 2018. № 6(4). С. 20–27.
- [5] Бігун Я. Й., Скутар І. Д. Усереднення в багаточастотних системах із запізненням та локально-інтегральними умовами. *Буковинський математичний журнал*. 2020. № 8(2). С. 14–23.
- [6] Y. Bihun, R. Petryshyn, I. Skutar. Multifrequency system with multipoint and integral conditions. *Acta et Coomentationes, Exact and Natural Sciences*. 2021. № 2(12). С. 11–24.

Системна методологія моделювання фільтраційних і гідравлічних процесів: ідентифікація кривих розділу сильно контрастних неоднорідно анізотропних середовищ методами комплексного аналізу

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.032>

Андрій Бомба

Кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
a.ya.bomba@nuwm.edu.ua

Сергій Каштан

Кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
s.s.kashtan@nuwm.edu.ua

Анотація—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 вважатимемо 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 водопору 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 квазіконформні відображення криволінійних багатокутних областей, обмежених невизначеними лініями течії та еквіпотенціальними лініями. Запропонований підхід, окрім ідентифікації кривих, дозволяє паралельно знаходити характеристичну функцію течії, квазікомплексний квазіпотенціал, повну витрату, будувати в заданій області динамічну сітку та розрахувати поле швидкості фільтрації.

Ключові слова—квазіконформні відображення, обернені задачі, неоднорідно анізотропне середовище, моделювання, ідентифікація, числові методи, аналіз даних.

частини деякими кривими, які потрібно знайти (ідентифікувати) в процесі розв'язування задачі. У цьому випадку шукану криву можна вважати еквіпотенціальною лінією.

У цій роботі йдеться про застосування методу квазіконформних відображень до ідентифікації кривої розділу пористих неоднорідно анізотропних середовищ.

Ефективним методом математичного моделювання фільтраційних процесів у криволінійних областях обмежених лініями течії та еквіпотенціальними лініями є розроблений нами у попередніх роботах [1–7] підхід на основі комплексного аналізу з використанням числових методів квазіконформних відображень. В роботах [5 – 7] побудовані алгоритми чисельного обернення розв'язків нелінійних крайових задач на конформні і квазіконформні відображення в одно та багатозв'язних областях, обмежених лініями течії та еквікватипотенціальними лініями – математичних моделей процесів руху рідин, газів, заряджених частинок і т.ін. в однорідних і неоднорідних анізотропних середовищах. Зокрема, у роботах [6; 7] розв'язані задачі моделювання відповідних процесів у середовищах, схильних до деформацій, де компоненти тензора провідності (зокрема фільтрації) приймались залежними не лише від координат біжучої точки області, але й від шуканих функцій течії та потенціалу. Запропонований підхід дозволяє паралельно знаходити характеристичну функцію течії, квазікомплексний потенціал, повну витрату і поле швидкостей та побудувати динамічну сітку.

I. Вступ

При моделюванні, наприклад, процесів масопереносу (фільтрації) в пористих середовищах можливі випадки існування сильно проникних шарів, які відокремлюються від досліджуваної його

II. Постановка задачі

Розглядаємо стаціонарний процес руху рідини в неоднорідно анізотропному горизонтальному нескінченно великих розмірів пласті – ґрунтовому

масиві, що обмежений нескінченними ділянками кривих, зокрема – нижньою кривою теоретичного водоупору $y = -a(x)$ ($a(x) \geq a_0 > 0$, $a(x)$ – неперервно диференційована функція) та віссю Ox – горизонтом (див. fig. 1) на якому відома локальна швидкість руху $v(x)$.

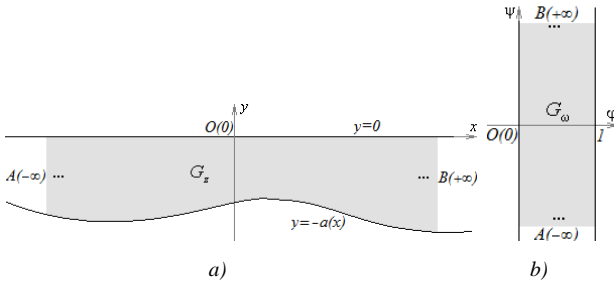


Figure 1. Схематичне зображення «нескінченної» фізичної області (а) та області комплексного квазіпотенціалу (б)

Задачу на ідентифікацію функції теоретичного водоупору $y = -a(x)$ та відшукування комплексно спряжених функцій квазіпотенціалу $\varphi = \varphi(x, y)$ і течії $\psi = \psi(x, y)$ у розглядуваній фізичній області G_z ($z = x + iy$) – внутрішності $\partial G_z = AOBV$ (площині поперечного перерізу ґрунтового неоднорідного анізотропного пласта з тензором провідності $\kappa = \begin{pmatrix} \kappa_{11} & \kappa_{12} \\ \kappa_{21} & \kappa_{22} \end{pmatrix}$) – однозв'язній криволінійній смугі, обмеженій лінією горизонту $AOB = \{z: y=0, -\infty < x < +\infty\}$ та невідомою лінією $BA = \{z: y=-a(x), -\infty < x < +\infty\}$ запишемо у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_{11} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \kappa_{12} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_{21} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \kappa_{22} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

$(x, y) \in G_z,$

$$\varphi|_{y=0} = 0, \quad \varphi|_{y=-a(x)} = 1, \quad \frac{d\varphi}{dn} \Big|_{y=0} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \Big|_{y=0} = v(x), \quad (2)$$

$-\infty < x < +\infty,$

де $(\kappa_{rs})_{r,s=1,2}$ – обмежені неперервно-диференційовані в області G_z функції, що характеризують провідність середовища, його анізотропію та схильність до деформацій, n – зовнішня нормаль до відповідної ділянки границі області ∂G_z , що, у цьому випадку, співпадає з напрямом осі Oy , $v(x)$ – локальна швидкість на

горизонті, причому $\psi(x, 0) = \int_0^x v(\tilde{x}) d\tilde{x}$.

Як відомо [5, 9], ця задача зводиться до квазіконформного відображення $\omega = \omega(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)$ фізичної області G_z (з невідомою ділянкою $y = -a(x)$, яка ідентифікується на основі аналізу даних, отриманих в процесі розв'язання задачі) на відповідну область

квазікомплексного потенціалу $G_\omega = \{\omega: 0 < \varphi < 1, -\infty < \psi < +\infty\}$ (див. fig. 1).

Алгоритм побудови розв'язку такої задачі будемо аналогічно до [5–8].

III. ВИСНОВКИ

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 екіпотенціальними лініями.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Бомба А. Я., Бойчура М. В., Мічута О. Р. Ідентифікація параметрів структури ґрунтових криволінійних масивів числовими методами комплексного аналізу. *Геофізичний журнал*. 2022. № 44. С. 53–67.
- [2] Бомба А. Я., Бойчура М. В. Ідентифікація структури ґрунтових масивів числовими методами квазіконформних відображень. *Кібернетика та системний аналіз*. 2021. № 57. С. 94–105.
- [3] Бомба А. Я., Бойчура М. В., Сидорчук Б. П. Узагальнення числових методів квазіконформних відображень для задач геології. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2020. № 5. С. 45–54.
- [4] Бомба А. Я., Бойчура М. В. Методи комплексного аналізу в задачах ідентифікації. Рівне: НУВГП, 2020. С. 188.
- [5] Методи комплексного аналізу / Бомба А. Я., Каштан С. С., Пригорницький Д. О., Ярошак С. В. Рівне: НУВГП, 2013.
- [6] Bomba A. Y., Kashtan S. S. On One Method for Constructing a Dynamical Mesh of Nonlinear Quasiperfect Processes in Deformable Anisotropic Media. *Journal of Applied Computer Science*. 2005. № 12. С. 7–21.
- [7] Бомба А. Я., Каштан С. С. Нелінійні обернення крайових задач на квазіконформні відображення в анізотропних середовищах. *Вісник Київського університету. Сер. Фізико-математичні науки*. 2001. № 4. С. 182–195.
- [8] Бомба А. Я., Каштан С. С. Ідентифікація кривих розділу сильно контрастних середовищ методами комплексного аналізу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2023. № 1. С. 17–22.
- [9] Положий Г. Н. Численное решения двумерных и трехмерных краевых задач математической физики и функции дискретного аргумента. Киев: КГУ, 1962. 161 с.

Уточнене комп'ютерне моделювання процесу вимірювального контролю у вихрострумовій структуроскопії на основі врахування апріорної інформації про найвпливовіші фактори щодо об'єктів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.033>

Володимир Гальченко

Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій
Черкаський державний технологічний університет
м. Черкаси, Україна
halchvl@gmail.com

Володимир Тичков

Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій
Черкаський державний технологічний університет
м. Черкаси, Україна
v.tychkov@chdtu.edu.ua

Abstract—На основі запропонованої методології, сутність якої полягає у визначенні профілів електрофізичних параметрів плоских об'єктів вихрострумове контролю шляхом використання сурогатної оптимізації в просторі пошуку скороченої розмірності, проведено моделювання процесу вимірювального контролю з використанням накопиченої апріорної інформації щодо найвпливовіших факторів, які діють на об'єкт.

Keywords—моделювання процесу вихрострумове контролю; профілі магнітної проникності та електричної провідності; метамодель; апріорна інформація; глибокі нейронні мережі; РСА-простір; сурогатна оптимізація.

I. ВСТУП

Вихрострумівий аналіз мікроструктури матеріалів є важливим інструментом у багатьох галузях науки, техніки та промисловості завдяки своїм унікальним властивостям та можливості детального аналізу, перевірки якості матеріалів, визначення їх електромагнітних властивостей, тобто їх профілів, та виявлення мікроструктурних відмінностей під час технологічних робіт з поверхневого їх зміцнення. До факторів, пов'язаних з об'єктом контролю (ОК), які мають значний вплив на вихрові струми і, відповідно, на результати вимірювань, відносяться електромагнітні властивості матеріалу, а саме електропровідність (ЕП) і магнітна проникність (МП); форма (циліндрична або плоска), розмір і конфігурація ОК; частота зміни електромагнітного поля збудження, що опосередковано визначає глибину проникнення

Руслана Трембовецька

Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій
Черкаський державний технологічний університет
м. Черкаси, Україна
r.trembovetska@chdtu.edu.ua

Наталія Тичкова

Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій
Черкаський державний технологічний університет
м. Черкаси, Україна
n.b.tychkova.asp21@chdtu.edu.ua

вихрових струмів; зазор між вимірювальною катушкою і ОК.

II. ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ

В цьому дослідженні розглядається моделювання процесу вимірювального контролю плоских об'єктів, що виконується із застосуванням накладних вихрострумівих перетворювачів (ВСП).

При моделюванні припускаємо, що ОК мають нескінченні геометричні розміри, середовище ОК вважається лінійним, однорідним та ізотропним. Визначення профілів ЕП і МП виконується чисельними розрахунками на основі даних вимірювань ВСП. Алгоритм розв'язання оберненої задачі вимірювання передбачає використання електродинамічної моделі процесу вихрострумове контролю. Для її спрощення приповерхневий прошарок ОК з певними структурними відмінностями, викликаними, наприклад, технологічними операціями поверхневого зміцнення, розглядаються як умовно багат шарові. Кожен умовний шар характеризується різними постійними значеннями електрофізичних параметрів. Імітація неперервності профілів ЕП і МП забезпечується великою кількістю умовних шарів. Електромагнітне поле збуджується генераторною катушкою ВСП з синусоїдальним струмом, що змінюється з певною кутовою частотою. Модель враховує, що котушка має прямокутний поперечний переріз скінченних розмірів, характеризується рівномірною густиною струму по перерізу і деякою кількістю витків.

На основі електродинамічної моделі [1] автори створили і ретельно перевірили програмний продукт, здатний розраховувати вихідний сигнал накладного ВСП за різних умов вимірювання. Верифікація цього продукту проводилася шляхом порівняння результатів як з розрахунками на основі аналітичних моделей, отриманих для одно- та двошарових ОК [2], так і з чисельними розрахунками методом скінченних елементів у середовищі COMSOL Multiphysics (модуль AC/DC) для тришарового об'єкта [3], де максимальна відносна похибка амплітуди і фази при визначенні векторного потенціалу не перевищувала 0,2% і 0,5% відповідно.

Вважалося, що під час проведення процедури вимірювання ВСП над плоским об'єктом, амплітуда і фаза сигналу фіксується відповідно до однієї з класичних схем. Математично вимірний сигнал e_{mes} може бути представлений в алгебраїчній формі у вигляді виразу: $e_{mes} = C_{mes} + j \cdot D_{mes}$, де C_{mes} та D_{mes} є відповідно дійсною та уявною його частинами. Така математична форма представлення сигналу дозволяє ефективніше будувати цільову функцію F , що використовується для визначення оптимальних значень шуканих параметрів моделі. Задача реконструкції профілів ЕП і МП зводиться до мінімізації наступної квадратичної функції:

$$F(\sigma, \mu, f, z) = (C_{mes} - G_{metamod})^2 + (D_{mes} - Z_{metamod})^2 \rightarrow \min,$$

де $e_{metamod} = G_{metamod} + j \cdot Z_{metamod}$ – значення сигналу, яке отримане з використанням нейромережевої проксі-моделі (метамоделі) на електродинамічну модель; σ, μ – відповідні вектори електрофізичних параметрів, що визначають шукані профілі; f – частота поля збудження; z – повітряний зазор між ВСП та ОК.

III. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

При моделюванні застосовувалася методологія досліджень, яка детально розглянута авторами та проілюстрована прикладами в роботах [4–6] та передбачає наступні основні етапи:

- "точний" розв'язок прямої електродинамічної задачі взаємодії квазістационарного електромагнітного поля, згенерованого накладним ВСП, з феромагнітним плоским ОК з неперервним профілями електрофізичних параметрів;
- планування обчислювальних експериментів [7] та побудова апіорних проксі-моделей (метамоделей) з використанням електродинамічних моделей на основі глибоких повнозв'язних MLP-нейронних мереж;
- розв'язок оберненої задачі вимірювання оптимізаційним гібридним популяційним метаевристичним алгоритмом із застосуванням сурогатної моделі, створеної на основі плану експерименту отриманому на попередньому етапі.

У цих дослідженнях заключний етап має певні особливості. Сурогатна оптимізація проводиться не

в повному проектному просторі, що визначається кількістю умовних шарів профілів ЕП і МП разом, а в латентному просторі зменшеної розмірності, який зберігає майже всі властивості повного простору з невеликою втратою інформації. Таке компактне представлення простору пошуку стало можливим завдяки використанню методу PCA (Principal Component Analysis), який лінійними перетвореннями визначає основні напрямки у просторі високої розмірності, що мають найбільший вплив на мінливість даних. Отже, в процесі оптимізації можна знайти компроміс між точністю розв'язку задачі і витратами обчислювальних ресурсів, контролюючи і вибираючи розмірність латентного простору пошуку. Після застосування оптимізаційного алгоритму виконується повернення до реального проектного простору для визначення шуканих профілів ЕП та МП. Отримані результати чисельного моделювання свідчать щодо досить високої точності розв'язку оберненої задачі.

IV. ВИСНОВКИ

Комп'ютерним моделюванням доведено ефективність запропонованих методів визначення профілів електрофізичних параметрів плоских ОК із застосуванням новітніх сурогатних стратегій у поєднанні з сучасними техніками глобальної оптимізації. Для мінімізації цільової функції застосовано евристичний біонічний гібридний алгоритм пошуку глобального екстремуму роєм часток із еволюційним формуванням складу рою. Створене алгоритмічне і програмне забезпечення реконструкції електрофізичних профілів ОК складає визначальні здобутки дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] T. P. Theodoulidis, and E. E. Kriezis. Eddy current canonical problems (with applications to nondestructive evaluation). Tech Science Press, 2006.
- [2] R. Trembovetska, V. Halchenko, and C. Bazilo. Inverse multi-parameter identification of plane objects electrophysical parameters profiles by eddy-current method. *International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering* (June, 2022), Cham : Springer International Publishing, pp. 202–212.
- [3] V. Halchenko, R. Trembovetska, C. Bazilo, and N. Tychkova. Computer Simulation of the Process of Profiles Measuring of Objects Electrophysical Parameters by Surface Eddy Current Probes. *Information Technology for Education, Science and Technics* : International Scientific-Practical Conference (June, 2022), Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 411–424.
- [4] V. Y. Halchenko, V. V. Tychkov, A. V. Storchak, and R. V. Trembovetska. Reconstruction of surface radial profiles of electrophysical characteristics of cylindrical objects during eddy current measurements with a priori data. The selection formation for the surrogate model construction. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. 2020. Vol. 1. Pp. 35–50.
- [5] V. Y. Halchenko, A. V. Storchak, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov. The creation of a surrogate model for restoring surface profiles of the electrophysical characteristics of cylindrical objects. *Ukrainian Metrological Journal*. 2020. Vol. 3. Pp. 27–35.
- [6] V. Y. Halchenko, A. V. Storchak, V. V. Tychkov, and R. V. Trembovetska. Measurements of near-surface radial profiles of electrophysical characteristics of cylindrical objects by the eddy current method using a priori data. *Ukrainian Metrological Journal*. 2022. Vol. 1. Pp. 5–11.
- [7] V. Halchenko, R. Trembovetska, V. Tychkov, and N. Tychkova. Construction of Quasi-DOE on Sobol's Sequences with Better Uniformity 2D Projections. *Applied Computer Systems*. 2023. Vol. 28(1). Pp. 21–34.

Моделювання прориву греблі методом гідродинаміки згладжених частинок

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.034>

Станіслав Довгий
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
м. Київ, Україна

Олег Буланчук
Лабораторія математичних наук
Національний центр “МАН України”,
м. Київ, Україна
obulan65@gmail.com

Галина Буланчук
Кафедра вищої та прикладної математики
Приазовський державний технічний університет, ПДТУ
м. Дніпро, Україна
ggbulan7@gmail.com

Анотація—У даній роботі представлені результати моделювання прориву греблі в замкнутому просторі методом гідродинаміки згладжених частинок (SPH). Для моделювання були використані відкриті коди програмного пакету SPHysics, для візуалізації - безкоштовний пакет Paraview. Методика може бути розширена на більш складні випадки: наявність споруд, вологе дно та тривимірний випадок.

Ключові слова—прорив греблі; метод гідродинаміки згладжених частинок; чисельне моделювання; SPH; SPHysics.

I. ВСТУП

Моделювання техногенних катастроф, зокрема проривів греблі залишається актуальним методом прогнозування, особливо зараз, під час війни, яку розпочала Росія на території України. Вночі 6 червня 2023 року окупаційні війська Російської Федерації підірвали греблю Каховської ГЕС. Слід відмітити, що ймовірність підриву була прогнозована шведською інженерною компанією Dämningsverket AB, яка провела відповідне математичне моделювання. Відео моделювання можна подивитись на YouTube [1]. Для моделювання було використано програмне забезпечення HEC-RAS 6.3 Інженерного корпусу армії США (SACE) [2] та дані про рельєф місцевості, отримані від NASA.

Унаслідок обстрілів військами РФ інфраструктури Києва ракетами все ще залишається загроза ушкодження і руйнування греблі Київської ГЕС. Українськими вченими був розроблений проєкт 2020.01/0421 «Прогнозування небезпечних впливів радіоактивно забруднених поверхневих вод і затоплення берегів: розвиток моделей та їх впровадження для зменшення наслідків надзвичайних ситуацій у м. Києві, спричинених водами р. Дніпро», який був виконаний в Інституті математичних машин та систем НАН України [3]. Проєкт був профінансований Національним фондом досліджень України (НФДУ).

Існує багато публікацій з даної тематики як для двовимірного, так і для тривимірного випадків, наприклад, [4; 5]. У роботі [6] описані історичні події прориву дамб, які можуть бути використані для перевірки модельних розрахунків.

II. МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ

У даній роботі для моделювання був використаний метод гідродинаміки згладжених частинок (SPH) [7]. Розрахунки були проведені для двовимірного випадку в обмеженій області. Даний метод особливо ефективний для задач з границями області, що сильно деформуються. Метод SPH є досить популярним також в силу того, що він дозволяє використовувати для обчислень сучасні графічні процесори, де розпаралелювання реалізовано апаратно. Це дозволяє значно пришвидшити розрахунки для тривимірного випадку.

Суть методу SPH полягає в тому, що рідина поділяється на дискретні частинки, величина яких має “порядок згладжування”. У межах цієї величини всі властивості згладжуються з використанням сусідніх частинок. Основна ідея базується на інтегральному представленні функції:

$$f(x) \approx \int_a^b f(x') W(x' - x, h) dx'$$

де h – радіус згладжування. У якості функції ядра W часто використовують функцію Гауса (функцію нормального розподілу) або кубічний сплайн. Порядок точності інтерполяції визначається гладкістю ядра.

В SPH методі рідина моделюється у вигляді скінченного числа частинок, які мають масу і займають певне положення в просторі. Частинки взаємодіють одна з одною через еволюційні рівняння. Неперервні інтеграли дискретизуються у вигляді квадратурних формул.

Математична модель, що описує рух рідини при прориві греблі, містить рівняння Нав'є-Стокса з

урахуванням сили тяжіння та рівняння нерозривності:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{v} + \vec{g}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \vec{v}$$

При програмній реалізації методу SPH використовувався наступний алгоритм:

- задавались початкові координати, швидкості, маса частинок, густина і тиск;
- задавався крок по часу;
- обчислювались сили тиску, в'язкості і гравітації;
- визначались швидкості частинок на наступному кроці;
- розраховувались координати частинок в наступний момент часу;
- для частинок, що перетинали границю області, розраховувалось відбиття частинок;
- розраховувалась густина в рівнянні нерозривності;
- обчислювався тиск по полю густини;
- здійснювався перехід на крок 3.

Проблема задоволення умови непротікання на границі може бути вирішена за допомогою різних підходів, які компенсують нестачу частинок поблизу границі.

Для розрахунків була використана платформа кодів гідродинаміки згладжених частинок SPHysics [8]. Відкритий код програмного пакету SPHysics написаний на мові високого рівня FORTRAN-95. Для візуалізації результатів розрахунків використовувався безкоштовний пакет Paraview [9].

III. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

На рис. 1 і рис. 2 представлені результати візуалізації положення частинок при прориві греблі в різні моменти часу. Припускалось, що в початковий момент часу відбувається падіння стовпа рідини прямокутної форми. Кольорова шкала демонструє залежність кольору частинок від їх швидкості. Темно синій колір свідчить про швидкість, близьку до нуля, а яскраво-рожевий – про максимальну швидкість. Результати вказують на те, що при русі до стінки хвиля має переважно значну швидкість, але при підході до стінки швидкість сплеску при русі вгору стає значно меншою. З часом швидкість всіх частинок затухає (рис. 2).

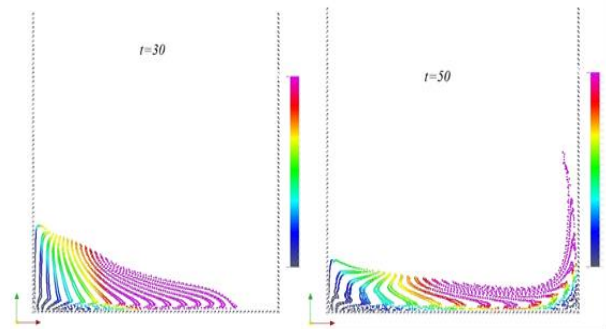


Рисунок 1. Положення частинок в момент часу t=30 і t=50

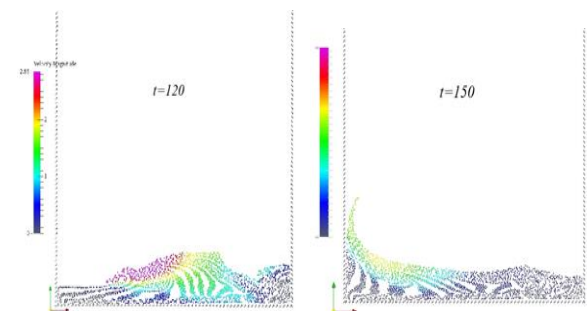


Рисунок 2. Положення частинок в момент часу t=120 і t=150

Дана методика моделювання дозволяє також врахувати більш складні граничні умови та може бути розширена на тривимірний випадок.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Worst case model of a dam break at the Nova Kakhovka dam [Електронний ресурс]. 2023. URL: <https://youtu.be/b587ZUKIZsI>.
- [2] HEC-RAS [Електронний ресурс]. 2023. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>.
- [3] Прогнозування небезпечних впливів радіоактивно забруднених поверхневих вод і затоплення берегів: розвиток моделей та їх впровадження для зменшення наслідків надзвичайних ситуацій у м. Києві, спричинених водами р. Дніпро [Електронний ресурс]. 2023. URL: https://nrfu.org.ua/wp-content/uploads/2022/01/2020.01_0421_bezhenar_028_01.2021_az.pdf.
- [4] Complex dam break simulation using the 2-D depth-averaged SPH flow model: a validation for tsunami application / M. H. Aslamia, B. D. Rogersb, P. K. Stansbyb, A. Bottacin-Busolinc. *IOP Conf. Ser. Earth and Environmental Science*. 2023. № 1169.
- [5] A. J. Crespo, M. Gomez-Gesteira, R. A. Dalrymple. Modeling Dam Break Behavior over a Wet Bed by a SPH Technique. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 2008. № 134. С. 313–320.
- [6] F. Aureli, A. Maranzoni, G. Petaccia. Review of Historical Dam-Break Events and Laboratory Testson Real Topography for the Validation of Numerical Models. 2021. # 13. URL: <https://doi.org/10.3390/w13141968>.
- [7] G. R. Liu, M. B. Liu. Smoothed Partificle Hydrodynamics: a meshfree particle method. World Scientific Publishing Company. 2003.
- [8] SPHYSICS Home Page – SPHYSICS [Електронний ресурс]. 2023. URL: https://wiki.manchester.ac.uk/sphysics/index.php/Main_Page.
- [9] ParaView - Open-source, multi-platform data analysis and visualization application [Електронний ресурс]. 2023. URL: <https://www.paraview.org/>.

Про один алгоритм розв'язання задачі комівояжера на основі методу оптимізації потоків даних

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.035>

Івохін Е.В.

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка
м. Київ, Україна
ivohin@univ.kiev.ua

Гавриленко В.В.

Факультет транспортних та інформаційних технологій
Національний транспортний університет
м. Київ, Україна
vgavrilenko1953@gmail.com

Івохіна К.Є.

Факультет транспортних та інформаційних технологій
Національний транспортний університет
м. Київ, Україна
ivohina@gmail.com

Анотація—У статті розглянуто методику послідовного застосування поточкових схем розподілу однорідного ресурсу для розв'язання задачі комівояжера, яка формулюється як задача пошуку маршруту відвідування заданої кількості міст без повторень з мінімальною відстанню руху або тривалістю пересування. Ставиться завдання формалізації алгоритму розв'язання задачі комівояжера за допомогою методу потокового розподілу ресурсу і використання схеми backtracking (повернення). Запропоновано використання методу Орліна оптимізації розподілу потоку на графі.

Ключові слова—задача комівояжера, метод розподілу ресурсів, алгоритм Орліна, схема з поверненням, жадібний підхід.

I. ВСТУП

Останнім часом більшість світових компаній зіткнулися з перебоями в логістиці, спричиненими пандемією та війною в Україні. Через санкції та події, які зв'язані з пандемією, менеджери логістичних компаній відчули серйозні збої у визначенні шляхів та обсягів перевезень, оскільки згадані процеси виявили слабкі сторони традиційних існуючих у логістиці ланцюгів поставок.

Відсутність вертикального бачення виробничих процесів та зв'язків, застарілі процеси управління попитом, недостатня стійкість до змін попиту та несподівані збої через залежність від ручних зусиль у логістичних операціях зруйнували ланцюжок поставок.

Компанії, що займаються логістикою, наразі змушені проаналізувати свої логістичні процеси. Ясно, що зміни в поведінці та очікуваннях клієнтів навряд чи зможуть усунути ці несподівані проблеми логістики, покупці очікували швидшої доставки та зручних можливостей відстеження товарів.

Стає зрозумілим, що компаніям необхідно швидко оптимізувати управління логістикою. Залежно від поставленої задачі, існує багато різних математичних підходів до різних логістичних проблем, такі як лінійне програмування, оптимізація мереж, аналіз рішень, генетичні алгоритми та інше.

Проблеми логістиці мають свої труднощі, деякі з яких вирішуються завдяки роботі менеджерського відділу, а інші передбачають аналіз та оптимізацію логістичних операцій, включаючи планування, координацію та контроль руху та зберігання товарів, послуг і інформації, оптимізацію потоків у мережі [1–3]. Завдяки методам і моделям імітаційного моделювання можна створювати комп'ютерні моделі логістичної системи та використовувати їх для тестування різних сценаріїв та оптимізації продуктивності системи.

Залучення математичних підходів для розв'язування логістичних задач набуває широкого впровадження, конкретний зміст якого залежить від характеру проблеми та наявних даних. Іноді вдається знайти нетипові методики розв'язання відомих задач, однією з яких є задача комівояжера.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА ТА АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ

За змістом задачі комівояжера (TSP, Travelling Salesman Problem) необхідно скласти маршрут руху в рамках заданої сукупності зв'язаних між собою пунктів (міст), що утворюють транспортну мережу конкретного регіону [4]. Особливістю задачі є те, що маршрут повинен містити усі пункти, що прописані у завданні, причому, кожен з пунктів потрібно відвідати не більше одного разу. Зрозуміло, що такі подорожі забирають багато часу, тому логічно, що необхідно скласти маршрут таким чином, щоб відстань, яку потрібно подолати, або час подолання

були мінімальними (в якості критерію може також розглядатися знаходження шляху з найменшими витратами).

Задача комівояжера – комбінаторна задача, для розв’язання якої можуть бути використані методи математичного програмування. Щоб навести задачу до загального вигляду, пронумеруємо міста числами $(1, 2, 3, \dots, n)$, а маршрут комівояжера опишемо циклічною перестановкою номерів $t = (j_1, j_2, \dots, j_n, j_1)$, причому всі j_1, \dots, j_n – різні номери. Номер j_1 , який повторюється з початку й у кінці, показує, що перестановка є циклічною [5].

Сукупність міст можна розглядати у вигляді вершин деякого графу з заданими відстанями (або часом пересування) між усіма парами вершин, які утворюють матрицю $C = (c_{ij})$, $i, j = \overline{1, n}$. Будемо вважати 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. У такій постановці задача називається замкненою задачею комівояжера (TSP), яка є відомою задачею математичного цілочисельного програмування.

Сформулюємо математичну модель задачі TSP. Нехай $I = \{1, \dots, n\}$ – множина індексів вершин графу задачі. Цільова функція – сумарна відстань або час проходження маршруту, що включає у себе усі вершини графу задачі. Параметрами задачі є елементи матриці $C = (c_{ij})$, $i, j \in I$.

Змінними задачі є елементи бінарної матриці переходів між вершинами $X = \{x_{ij}\}$, $i, j \in I$, які дорівнюють 1, якщо у побудованому маршруті для задачі присутнє ребро (v_i, v_j) , 0 – інакше [6]. Оптимальним є найкоротший за відстанню або за часом маршрут:

$$E = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

з обмеженнями

$$\begin{aligned} \sum_{j \in I, j \neq i} x_{ij} &= 1, \quad i \in I, \\ \sum_{i \in I, i \neq j} x_{ij} &= 1, \quad j \in I, \end{aligned} \quad (2)$$

$$v_i - v_j + nx_{ij} \leq n - 1, \quad 1 \leq i \neq j \leq n.$$

Остання нерівність забезпечує зв’язність маршруту обходу вершин, він не може складатися з двох і більше незв’язаних частин.

III. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

При формуванні маршруту необхідно звернути увагу на те, що кожний наступний етап руху можна обирати на основі послідовного залучення методів оптимізації розподілу однорідного ресурсу, одним з найефективніших серед яких є метод Орлина [7]. Тоді завдання даного дослідження можна

сформулювати у вигляді формалізації алгоритму розв’язання задачі комівояжера за допомогою методу потокового розподілу ресурсу і використання схеми з поверненням (backtracking).

Розглянемо застосування методу для нашої задачі. Цей метод дозволяє розв’язати задачу розподілу однорідного ресурсу з проміжними пунктами у вигляді орієнтованого графа $G(V, E)$ без петель та паралельних ребер, що задається сукупністю непорожньої множини V вершин і множини E ребер:

$$E \subset \{v_i, v_j\} = \langle V, E \rangle, \quad G(V, E) = \langle V, E \rangle, \quad V \neq \emptyset, \quad (3)$$

$$v_i, v_j \in V, \quad i \neq j$$

де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$, N та M – загальна кількість вершин і ребер графа відповідно. При цьому передбачається, що множина V вершин графа $G(V, E)$ представлена сукупністю підмножин, що не перетинаються:

1. V_s – підмножина початкових вузлів (вершин) графа;
2. V_p – підмножина проміжних вузлів (вершин) граф;
3. V_e – підмножина кінцевих вузлів (вершин),

тобто, $V = V_s \cup V_p \cup V_e$, за умови, що $(V_s \cup V_p) \cap V_e = \emptyset$ і $|V_s| = N_1$, $|V_p| = N_2$, $|V_e| = N_3$, $N = N_1 + N_2 + N_3$, а під вагою ребер розуміється час на подолання відповідного етапу маршруту.

IV. ЗАПРОПОНОВАНИЙ АЛГОРИТМ

Зрозуміло, що пошук маршруту на графі передбачає залучення методики з поверненням (backtracking) [8]. Розв’язання задачі на основі застосування backtracking зводиться до послідовного розширення частинного розв’язку. Якщо на черговому кроці розширення провести не вдається, то відбувається повернення до більш короткого частинного розв’язку та продовжується пошук далі. Даний алгоритм дозволяє знайти усі розв’язки поставленої задачі, якщо вони існують. Відомо, що використання алгоритмів на основі схеми пошуку з поверненням при розв’язанні практичних задач суттєво обмежується невисокою швидкістю роботи та значними вимогами до обчислювальних ресурсів. Для прискорення роботи методу намагаються організувати обчислення таким чином, щоб якомога раніше виявляти варіанти, які не є оптимальними, або використовувати при побудові кожного кроку схеми відбору на основі жадібного підходу. Це дозволяє значно скоротити час знаходження розв’язку.

Жадібний підхід формується відповідно принципу обирати оптимальний розв’язок на кожному кроці, не зважаючи на попередні кроки, які зроблені, або будуть зроблені попереду. Іншими словами, жадібна методика базується на локально оптимальному виборі із сподіванням, що цей вибір приведе до глобально оптимального розв’язку.

Потрібно зауважити, що не існує можливості перевірки якості застосування жадібних алгоритмів у розв'язуванні конкретної прикладної задачі, однак для задач, в яких послідовність локальних оптимумів прямує до глобального оптимального розв'язку даний підхід є дуже перспективним.

Жадібна методика, що пропонується авторами, передбачає розгляд на кожному етапі формування маршруту найбільш швидкісного за часом напрямку руху. Комбінований підхід на основі методу розподілу ресурсу та жадібного вибору напрямку руху дозволив реалізувати конструктивну схему розв'язання задачі комівояжера.

Схема, яка може бути сформульована у вигляді такого рекурсивного алгоритму для мережі з N вузлів та заданого часу переміщення для кожної пари вершин:

0 крок. Формуємо початкову інформацію методу розподілу потоку. Вихідна вершина маршруту комівояжера визначає підмножину початкових вузлів методу, множина напрямів з неї задає підмножину проміжних вузлів, а вершини графа, доступні з цього підмножини, визначають множину кінцевих вузлів.

На основі методу Орліна розподілу потоку визначаємо час досягнення кожної з кінцевих вершин на підмережі з початкових, проміжних та кінцевих вершин.

Вибираємо найменший час переміщення та відповідний етап маршруту, відзначаємо вибрані вершини та переходимо до формування даних для нового завдання розподілу потоку. Переходимо наступний крок алгоритму.

s крок, $s=1,2,3,\dots$. Будуємо нові підмножини початкових, проміжних і кінцевих вершин, крім подальшого розгляду зазначені раніше вершини.

Якщо на поточному кроці неможливо визначити нові підмножини (всі вершини відмічені), повертаємось до попереднього кроку, знімаємо мітки з етапу маршруту, відзначаючи тупиковий напрямок, і переходимо до наступного можливого шляхом вибору найшвидшого напрямку руху.

Повторюємо цей процес до досягнення кінцевої точки маршруту, що збігається з вихідною точкою.

Якщо маршрут збудовано, але не включає всіх вершин графа, повертаємось на попередні рівні та перебудовуємо всі робочі підмножини, обираючи нові напрямки руху з урахуванням швидкості пересування.

Фінальний крок. В результаті роботи остаточно отримуємо циклічну перестановку номерів вершин графа, що визначає послідовність етапів маршруту комівояжера.

Для аналізу ефективності роботи алгоритму було проведено обчислювальні експерименти, у межах яких для вирішення задачі комівояжера на мережі з 11 пунктів використовувалися різні методи (повного перебору, жадібний метод, відпалу і запропонований вище). Проведено порівняння результатів.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто спосіб формалізації алгоритму розв'язання задачі комівояжера за допомогою методу потокового розподілу ресурсу і використання схеми backtracking (повернення). Запропоновано використання методу Орліна оптимізації розподілу потоку на графі. Коротко описано схему формалізації процедури використання методу з реалізацією схеми backtracking для розв'язання задачі комівояжера з мінімальною тривалістю руху за маршрутом. Запропоновано варіант прискорення швидкості роботи розробленого алгоритму, який полягає у залученні жадібної методики у процедурі вибору ділянок маршруту: планування кожного наступного етапу пересування визначається на основі вибору найбільш швидкого напрямку руху, що дозволяє отримати конструктивну схему розв'язання задачі комівояжера. Наведено результати роботи запропонованого алгоритму для обчислення розв'язків задачі комівояжера з мінімізацією тривалістю руху, проведено порівняння отриманих розв'язків з розв'язками, знайденими відомими точними та евристичними методами. Проведено аналіз впливу жадібного підходу на швидкість роботи розробленого алгоритму. Зроблено висновки, запропоновано подальший розвиток запропонованої методики для розв'язання задач комівояжера.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] M. Christopher. Logistics and Supply Chain Management. *FT Publishing International*. 2016. № 5.
- [2] A. Harrison, R. van Hoek. Logistics Management and Strategy. *Financial Times Management*. 2005. № 2.
- [3] G. Ghiani, G. Laporte, R. Musmanno. Introduction to Logistics Systems Planning and Control. *John Wiley & Sons Ltd*. 2004.
- [4] Зайченко Ю. П. Дослідження операцій. Київ : Видавничий дім «Слово», 2006. 816 с.
- [5] Гребеннік І. В., Чорна О. С., Макарова Е. Е. Оптимізація лінійних функцій на множині циклічних перестановок з лінійними обмеженнями. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 3. С. 67–72.
- [6] R. J. Vanderbei. Linear programming: Foundations and extensions. *Springer Cham*. 2014.
- [7] J. B. Orlin. A Faster Strongly Polynomial Algorithm for the Minimum Cost Flow Problem. *Operations Research*. 1993. № 41. С. 338–350.
- [8] D. Watson. A Practical Approach to Compiler Construction. *Springer Cham*. 2017.

Ефективність стратегій в боротьбі з епідемією

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.036>

Ігор Косович

Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича
м. Чернівці, Україна
kosovych.ihor@chnu.edu.ua

Анотація—У роботі розглядається вплив пандемії COVID-19 на суспільство та роль математичного моделювання для аналізу поширення інфекційних хвороб. Вивчено різні стратегії для боротьби з епідемією, включаючи соціальне дистанціювання, локдаун та медичне лікування за допомогою методів навчання з підкріпленням та нейронних мереж. Результати дослідження показують, що стратегії з обмеженнями та лікуванням можуть ефективно зменшити поширення інфекції, що є важливим для боротьби з пандемією.

Ключові слова—COVID-19, математичне моделювання, навчання з підкріпленням, нейронні мережі.

I. ВСТУП

З кінця 2019 року, із появою COVID-19, світ кардинально змінився в багатьох аспектах: пандемія вплинула на різні складові повсякденного життя, а саме на економіку, освітній процес, систему охорони здоров'я та на суспільство. Швидка глобалізація, постійні подорожі та постійна інтеракція між людьми в багатьох сферах призводять до того, що захворювання можуть поширюватися з величезною швидкістю.

Через те, що процес передачі інфекційних хвороб не може бути вивчений експериментально, то математичні інструменти, безумовно, забезпечують чудову альтернативу дослідження механізму їх поширення для ефективного контролю засобами математичного моделювання.

II. ОГЛЯД ПРАЦЬ

Для моделювання інфекційних захворювань найпоширеніший спосіб є класичні SIR-моделі [1]. Недоліками даного підходу є складність належним чином змоделювати індивідуальну поведінку агента. Для того, щоб виправити ці прогалини розглядають моделювання із використанням методу клітинних автоматів. Головним аспектом у даному підході є застосування локалізації, яка дозволяє враховувати імовірність контакту між інфікованими агентами. У роботі [2] розглянуто сценарії моделювання з карантинними обмеженнями. Найкращу ситуацію показує моделювання з різними комбінаціями: самоізоляцією, масковий режим і вакцинація. Тут не має стрімкого піку кількості інфікованих агентів, можна розвантажити медичну систему без критичності з переповненістю.

У даній роботі застосовується метод “Multi-agent reinforcement learning” для моделювання взаємодії поширення вірусу в динамічному середовищі [3].

Без жодних витрат на впровадження соціального дистанціювання найкращим варіантом є виконання 100% соціального дистанціювання. Кількість інфікованих дорівнює 0 і неможлива передача вірусу. Варіант нереальний, тому що відсутня будь-яка взаємодія в суспільстві.

При скороченні дистанціювання до 50% крива не має високого піку і є досить згладженою.

Для більш практичної поліси потрібно розглядати 10%, 25%, 30% соціального дистанціювання. Це значно згладжує криву та дає можливість зменшити кількість інфікованих і не сильно впливати на доковідне життя.

III. МЕТОДИ

A. Модель

Основна мета навчання з підкріпленням є навчити агента, що приймає рішення, максимізувати нагороду (у цьому випадку, мінімізувати кількість випадків захворювання) незважаючи на невизначеність щодо середовища. У кожний момент часу t , агент має комбінацію станів a_t , стан s_t і нагороду r_t . Після взаємодії із середовищем у кожний момент часу t агент отримує винагороду за стан r_t від середовища, а потім вибирає дію a_t . Середовище бачить дію агента a і переходить до наступного стану s_i , нарешті, агент отримує наступну винагороду від середовища. Таким чином, агент навчання з підкріпленням намагається максимізувати кумулятивну винагороду за допомогою зворотнього зв'язку (винагороди), отриманого після виконання дії.

B. Стан і винагорода

Ми визначили наступний простір дій/станів: ніяких обмежень, локдаун + карантин, локдаун + лікування.

Стратегія ніяких обмежень, означає, що агенти живуть своїм життям без накладання додаткових обмежень у часові періоди, коли не має великої кількості інфікованих.

Стратегія локдаун + карантин передбачає введення обмежень на рух та контакти людей у випадку, коли є інфіковані агенти. При введенні цієї стратегії агент намагається зменшити поширення вірусу, без отримання жодного лікування. Якщо вже пройшов певний час (у коді вказано

"recovery period"), то деякі люди можуть одужувати від самої хвороби, і кількість випадків зменшується на кількість тих, що одужали.

Стратегія локдаун + лікування також передбачає введення обмежень (локдауну) для зменшення поширення вірусу, але додатково передбачає лікування. Вона застосовується коли є інфіковані агенти. Агент намагається контролювати поширення вірусу через локдаун і, крім того, намагається лікувати хворих. Якщо особа хворіє, їй надається певна кількість лікування, і це може призвести до одужання частини хворих.

Отже, різниця між двома стратегіями полягає в тому, що "локдаун + лікування" включає в себе лікування, що може призводити до більш значного зменшення кількості випадків COVID-19 в порівнянні з "локдаун + карантин," де лікування відсутнє, і кількість випадків зменшується лише через обмеження контактів.

Винагорода була розроблена так, щоб покарати прискорене зростання випадків інфекції і смерть.

Тому вона обчислювалась, як максимальне значення кількості агентів, що одужали за ітерацію.

C. Архітектура моделі

У цьому дослідженні наш агент був навчений на основі Deep Q-Network (DQN), яка є варіантом Deep Q-Network серед глибоких алгоритмів RL, для прийняття рішень у симуляції епідемії, де агент навчається вибирати дії, щоб максимізувати нагороду (у н випадку, мінімізувати кількість випадків захворювання).

Модель є послідовною нейронною мережею (Sequential) з кількома шарами Dense (Рис. 1).

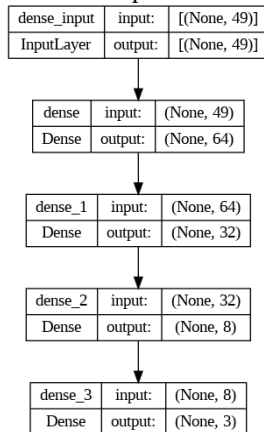


Рисунок 1. Архітектура нейронної мережі

Функції активації для шарів – ReLU (Rectified Linear Unit) для всіх, крім останнього, який має функцію активації "linear".

Модель компілюється з функцією втрати "mse" (Mean Squared Error) і оптимізатором Adam.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ

У цьому розділі ми розглянемо результати нашого дослідження, які представлені на рисунках. Детальний аналіз цих даних дозволить нам зробити важливі висновки щодо ефективності різних стратегій в боротьбі з епідемією.

Рисунок 2 показує частоту дій "Lockdown/Quarantine" та "Lockdown + Cure" в порівнянні з "Sit". це може означати, що стратегії зі збільшеними обмеженнями та лікуванням мають

важливу роль у зменшенні епідемії. Популярність цих стратегій може свідчити про їх ефективність.

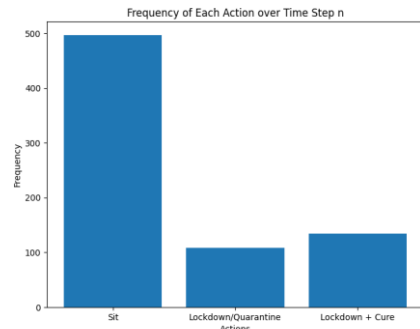


Рисунок 2. Частота застосування кожного стану

Режим "Lockdown/Quarantine" відображає підвищення кількості випадків інфікованих. Можна зрозуміти, що цей режим сприяє загальній тенденції до збільшення захворюваності.

В той час режим "Lockdown + Cure" демонструє досить вражаюче зниження кількості випадків захворювання, що вказує на успішну боротьбу з епідемією. Це послаблення епідемії може бути результатом введення обмежень і одночасного лікування хворих.

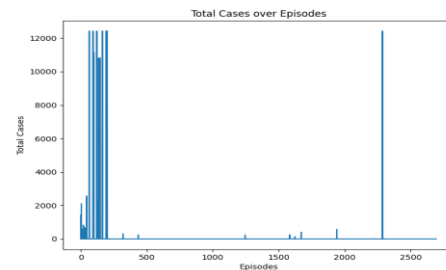


Рисунок 3. Загальна кількість випадків епідемії всіх ітерацій

Рис. 3 показує загальну кількість випадків епідемії, де лінія знижується з плином часу. Це свідчить про успішну стратегію контролю епідемії. Якщо крива падає різко і стає практично горизонтальною, це означає досягнення "плато" з мінімальною кількістю випадків.

Аналіз числових значень показує, що кількість випадків зростає досить повільно в перші дні і значно прискорюється під час режиму "Lockdown/Quarantine". Після цього режиму кількість випадків знову спадає швидше.

Загалом, можна сказати, що введення режиму "Lockdown + Cure" сприяє зниженню розповсюдження епідемії та зменшенню кількості випадків.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] N. Bacaër. McKendrick and Kermack on epidemic modelling (1926–1927). *A Short History of Mathematical Population Dynamics*. London : Springer, 2011. Pp. 89–96.
- [2] I. Kosovych, I. Cherevko, Y. Vyklyuk, and D. Nevynskiy. Simulation of Various Distribution Restrictions of COVID-19 using Cellular Automata. *12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT, September 26–28, 2022)*. Spišská Kapitula, Slovakia. Pp. 58–61.
- [3] Косович І. Моделювання навчання з підкріпленням для соціального дистанціювання під час COVID-19. Сучасні проблеми механіки та математики : Міжнар. наук. конф. (23–25 травня 2023 р., Львів, Україна), 2023. С. 253–254.

Моделювання багатопортової гетероасоціативної пам'яті (БГАП) на основі еквівалентністних моделей, що реалізуються на векторно-матричних перемножувачах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.037>

Володимир Красиленко
Вінницький національний аграрний університет
ВНАУ
м. Вінниця, Україна
krasvvg@i.ua

Ілля Чіков
Вінницький національний аграрний університет
ВНАУ
м. Вінниця, Україна
ilya95chikov@gmail.com

Діана Нікітович
Вінницький національний аграрний університет
ВНАУ
м. Вінниця, Україна
diananikitovych@gmail.com

Анотація—Робота присвячена розгляду питань стосовно асоціативної обробки інформації з метою апаратно-програмної реалізації відповідних математичних, імітаційних та фізичних моделей асоціативної пам'яті. На основі огляду відомих публікацій, в тому числі тих, у яких були розглянуті еквівалентністні моделі асоціативної та гетероасоціативної пам'яті та показані їх переваги, обґрунтовано необхідність подальших досліджень таких моделей АП чи ГАП та проведення імітаційних модельних експериментів в плані пошуку їх ефективних реалізацій. Наведені результати імітаційного моделювання двох реалізацій багатопортової гетероасоціативної пам'яті (БГАП) на основі векторно-матричних перемножувачів та векторно-матричних еквіваленторів, які, як прискорювачі, адаптовані до еквівалентністних моделей. Результати моделювання процесів гетероасоціативного розпізнавання кортежу букв, виконані у Mathcad для двох варіантів реалізації БГАП, підтверджують їх правильне функціонування, оскільки на виходах-портах БГАП сформовані моделями правильні кортежі всіх вихідних 100 букв, попарно асоційованих зі 100 вхідними буквами.

Ключові слова—багатопортова асоціативна пам'ять, еквівалентнісна модель, нейронна мережа, гетероасоціативна пам'ять, ємність асоціативної пам'яті, векторно-матричний перемножувач.

1. ВСТУП, ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ

Актуальність та необхідність дослідження процесів природнього інтелекту, асоціативної обробки інформації з метою апаратно-програмної реалізації відповідних математичних, імітаційних та фізичних моделей асоціативної пам'яті (АП) обумовлена широким застосуванням в останні десятиріччя самих новітніх біологічно натхненних

та нейрофізіологічних принципів в нейрокібернетиці, в сучасних інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, системах дистанційного моніторингу, в робото-технічних системах розпізнавання та ідентифікації образів самого різноманітного типу та для самих різноманітних проблемно-орієнтованих сфер застосування. Відома ціла низка нейронних моделей та мереж, що реалізують авто-асоціативну та гетероасоціативну пам'ять (ГАП) [1–11]. Але аналіз значної частки за тематичним подібним спрямуванням включно з публікацій, вищевказаними [5–14], та більш нових та недавніх робіт [15–21] показує, що ємність таких моделей АП, яка визначається кількістю запам'ятованих та успішно асоційованих (розпізнаних) образів, не перевищує $(0,14-0,60) \cdot N$, де N —кількість нейронів у моделі АП. В той же час, ще більш як 15 років тому, появились роботи [12–14], в яких були запропоновані та досліджені, так звані авторами, еквівалентністні моделі (ЕМ) нейромереж (НМ) та АП (ГАП), а в них експериментально були підтверджені їх суттєві переваги у порівнянні з іншими відомими моделями та нейронними парадигмами, особливо стосовно їх ємності та більш зручного відображення на апаратні паралельні процесори. Ємність таких ЕМ АП може, як мінімум у 4–5 разів перевищувати N , хоч часткові модельні експерименти дозволяють стверджувати про ще більшу на порядки їх ємність. Крім того, ЕМ АП допускають значно більшу потужність завад, що перекручують та змінюють вхідні образи, при яких якісно та правильно формуються асоціативні відгуки. Все це обумовлює цікавість до подальших досліджень таких ЕМ АП чи ГАП в плані пошуку їх ефективних реалізацій. В роботах [12–14; 22] були промодельовані та досліджені чотири еквівалентністні моделі, в результаті чого було

зроблено висновки, що такі моделі успішно можуть бути застосовані для побудови не лише однопортової але і багатопортової, більш загальної, ГАП для обробки та розпізнавання образів з сильною кореляцією та значним їх ушкодженням завадами. В роботах [22; 23] були запропоновані та висвітлені деякі можливі апаратні реалізації таких ЕМ моделей, модифікованих під обробку 1-D чи 2-D образів. Але більшість цих пропозицій стосувалися лише однопортових реалізацій АП, що базувалися на використанні оптичних систем з просторовим та часоімпульсним інтегруванням [22; 23]. Однак такі реалізації є суто аналоговими, а тому не допускають ні суттєвого збільшення динамічного діапазону значень оброблюваних сигналів і точності обчислювальних процедур, ні збільшення розмірності образів (векторів чи матриць), що запам'ятовуються в АП. Крім того, в тих же роботах на основі моделей, процедур обробки було визначено, що застосування найбільш узагальнених еквівалентнісних моделей для реалізації багатопортової ГАП (БГАП) потребує векторно-матричних чи матрично-тензорних процедур з операціями еквівалентності (нееквівалентності), або спеціалізованих пристроїв-прискорювачів, так званих векторно-матричних еквіваленторів (ВМЕ). Оскільки, як було показано авторами роботи [22], ВМЕ реалізуються на основі двох векторно-матричних перемножувачів (ВМП), то це дозволяє застосовувати високопродуктивні швидкодіючі векторно-матричні спеціалізовані обчислювачі, матричні та систолічні процесори для побудови БГАП.

Вище наведений огляд та аналіз публікацій дозволяє визначити, як одне з важливих завдань, необхідність розроблення та моделювання таких ЕМ БГАП, які були б найкраще пристосованими для реалізації на базі ВМП чи ВМЕ, та визначення характеристик та показників таких моделей та реалізацій.

II. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМ БГАП НА БАЗІ ВМП ТА ВМЕ

Теоретичні основи проектування БГАП на основі ЕМ були розроблені та наведені в роботах [12–14; 22; 23]. А тому тут, з метою верифікації таких моделей та якості функціонування запропонованих БГАП на їх основі, ми розглядаємо лише аспекти моделювання вищезазначених об'єктів та аналізуємо отримані результати. Для імітаційного моделювання та проведення експериментів у Mathcad ми створили навчальну вибірку зі взаємно пов'язаних (асоційованих між собою) різних образів у вигляді векторів, які є елементами деякої множини. Для кращої наочності, візуалізації та прискореного сприйняття і порівняння, в одному з експериментів в якості образів було вибрано

кодові вектори символів-літер ASC11, при цьому використано здебільше саме букви. Кожен кодовий вектор букви, чи вхідної чи з навчального набору, є чотирикратним повторенням восьми-бітового двійкового коду Грея (байту), числовим еквівалентом якого є число з діапазону від 0 до 255, яке є кодом символу. У процедурах перетворення традиційних двійкових кодів у двійкові коди Грея нами у Mathcad використовувалися моделі на базі векторизованих операцій еквівалентності (нееквівалентності). А чотирикратне повторення байтів кодових векторів нами використовувалося для збільшення розмірності векторів-образів та для можливості перевіряти завадостійкість при розпізнаванні образів у БГАП і в умовах розширеного діапазону потужності завад, яка пропорційна кількості змінених біт у кодових векторах.

Процедура введення 128 символів (фрагмент з частиною введених різних букв чи символів) показано на рисунку 1 (а). Кожен символ у відповідності до прийнятої системи кодування кодується байтом. На цьому ж фрагменті показана процедура введення 100 англійських букв чи символів, що будуть відповідати 100 вхідним портам, на кожен з яких подається кодовий вектор відповідної букви чи відповідного символу. Для формування пар гетеро-асоційованих образів ми за допомогою циклічного зсуву ставили у відповідність кожній букві зі створеного 100-буквенного набору наступну за нею букву. На рисунку 2 показані бінарне 2-градаційне зображення розмірністю 100×32 елементів (матриця INPX) та контрастне обернене зображення (матриця INPXN), що відповідають 100 входам БГАП. На рисунку 2 також показані у вигляді таких же двох бінарних матриць TX та TXN розмірністю 32×128 елементів 128 векторів навчальної вибірки, в яку введені 128 різних символів та букв з клавіатури ПЕОМ після їх перетворення у 32-х компонентні бітові вектори. Використовуючи формули, що наведені внизу рис. 2, нами була сформована у відповідності до кожного з 128 навчальних векторів (матриця TX та TXN) сукупність з 128 асоційованих навчальних векторів у вигляді матриць TY та TYN (на рис.3 вони показані транспонованими). Тобто першій букві з набору TX ставилася у відповідність друга буква, кожній подальшій букві – наступна, а останній – перша. На рис. 3 (зліва) показані формули, що були нами використані для моделювання процедур знаходження за допомогою двох векторно-матричних перемножувачів (ВМП) необхідних матриць (HN та HNN) нормованих еквівалентностей та нееквівалентностей на першому кроці. Там же показані фрагменти вікон з результатами моделювання процедур обчислення вихідних матриць (OUTY ii OUTYN) нормованих еквівалентностей та нееквівалентностей на другому кроці.

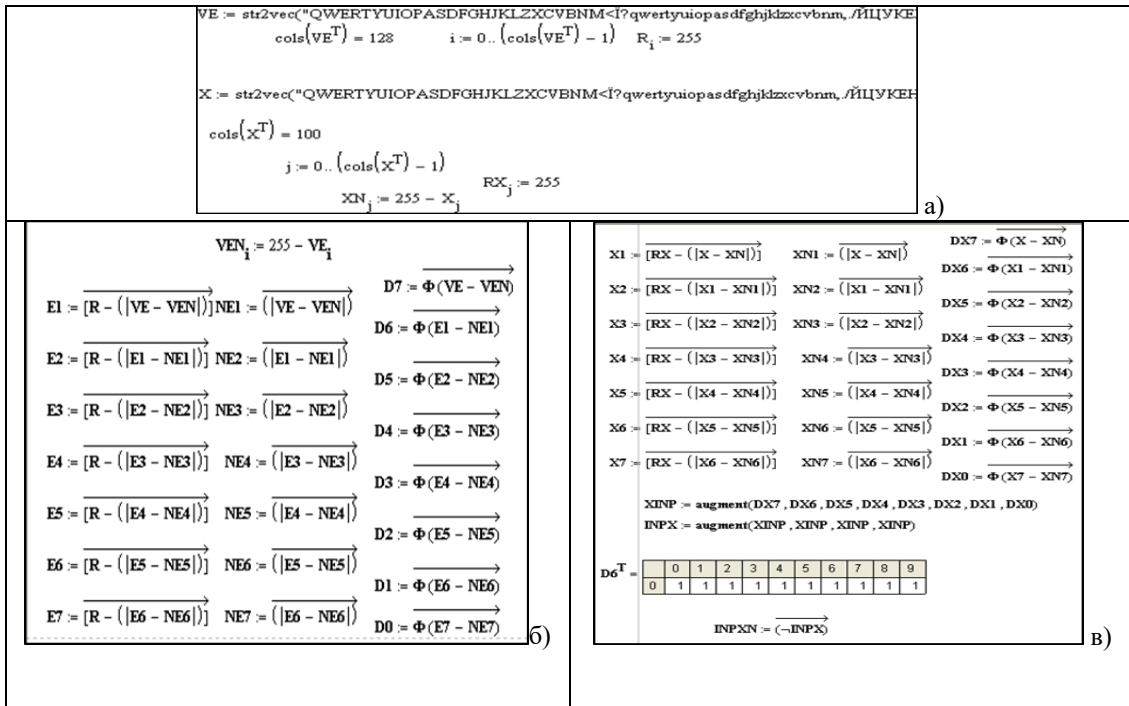


Рисунок 1. Вигляд фрагментів з вікон Mathcad, які описують процедури (а) введення набору вхідних векторів та формування з неї навчальної вибірки, формули (б) для кодування та формування матриці навчальних векторів, формули (в) для аналого-цифрового перетворення та кодування набору вхідних образів

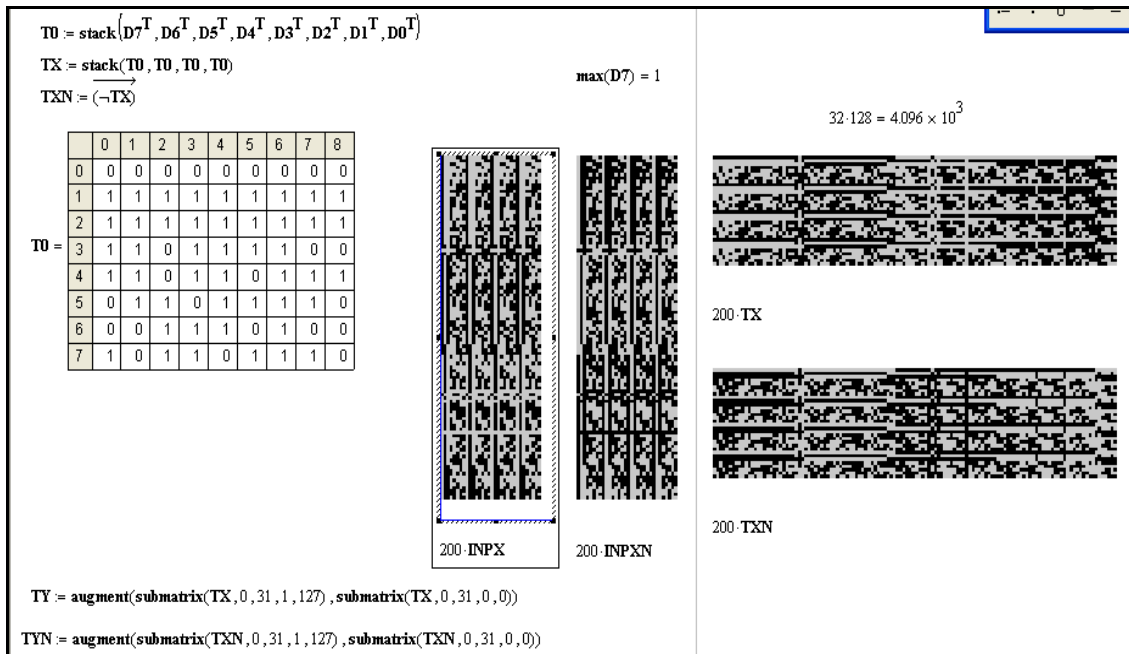


Рисунок 2. Зображення матриць, що відповідають вхідному багатовекторному входу та першій половині навчальної вибірки

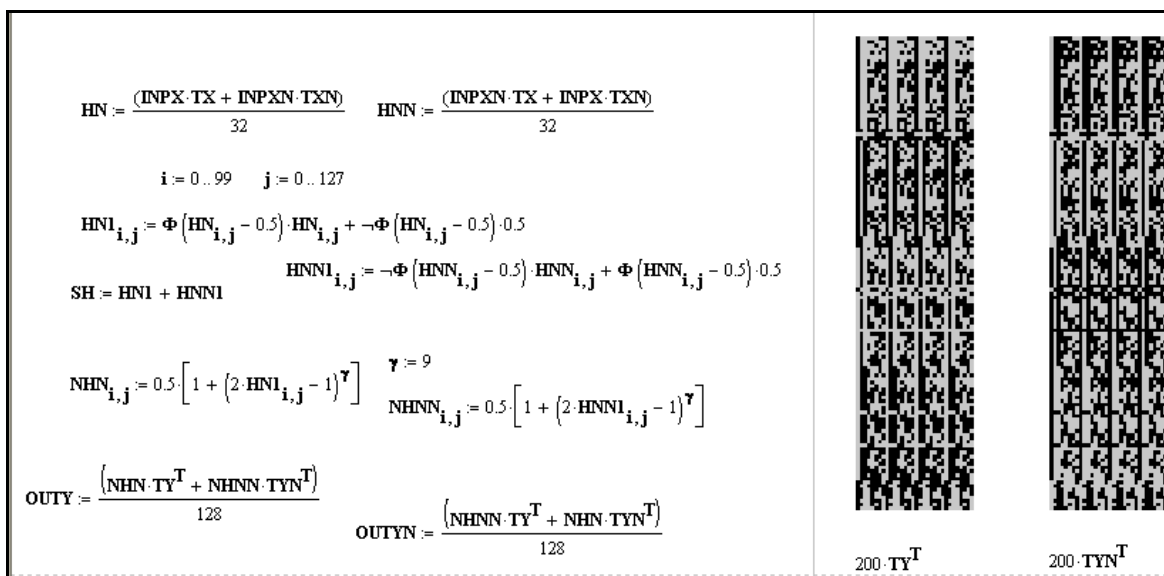


Рисунок 3. Зображення другої (вихідної) половини навчальної вибірки у вигляді зображень матриць (праворуч) та формули векторно-матричних еквівалентністих та нелінійних перетворень сигналів нейронів прихованого прошарку (ліворуч)

Крім того, на рис. 3 показані формули нелінійного перетворення сигналів нейронів прихованого прошарку з коефіцієнтом нелінійності γ , що відповідають по-компонентним нелінійним перетворенням матриць NHN та NHNN. Як видно з рисунка 4, використання операцій та векторизованих перетворень, що відтворюють порогову по-компонентну обробку суб-векторів та формування масиву вихідних векторів-відгуків на виході БГАП з наступним їх перетворенням у вихідні букви-символи, дозволили правильно сформулювати необхідний кортеж букв, в якому всі 100 пар правильно асоційовано розпізнано. Вхідний та утворений вихідний кортежі букв показані на рисунку 4 внизу. Таким чином, отримані результати моделювання підтверджують правильне

функціонування БГАП, оскільки на виходах-портах БГАП утворюється кортеж вихідних 100 букв, попарно асоційованих зі 100 вхідними буквами. Як бачимо, всі 100 букв на виході БГАП розпізнані у відповідності до сформованих навчальною вибіркою гетеро-асоціацій, як при використанні для моделювання моделі БГАП на базі ВМЕ (результати показані на рис. 5), так і при використанні у модельних експериментах моделі БГАП на базі ВМП (результати показані на рис. 6). Утворені кортежі символів-букв, що відображені також на рис. 5, свідчать про успішні відтворення всіх асоційованих пар, а саме формування для кожної букви з вхідного кортежу відповідної їй наступної.

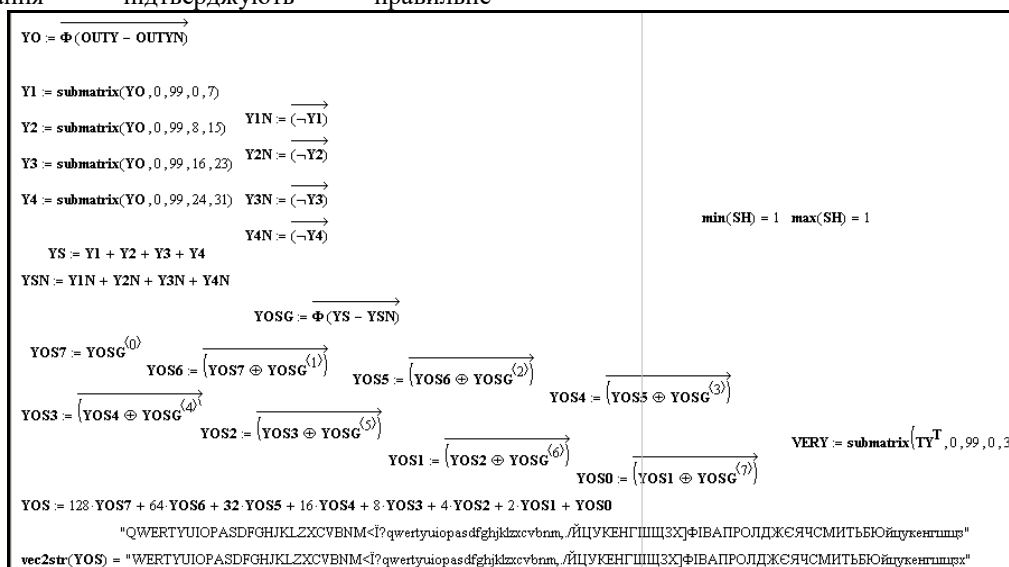


Рисунок 4. Вікно Mathcad з формулами для моделювання функцій активації та порогової обробки при формуванні масиву відгуків БГАП у вигляді вихідних векторів

Додаткові експерименти показали, що промодельовані можливі варіанти реалізації БГАП допускають у допустимих межах ушкодження завадами кодових векторів, яке не спричиняє до

порушень правильного функціонування БГАП. Про ці додаткові аспекти отриманих результатів буде повідомлено у доповіді.

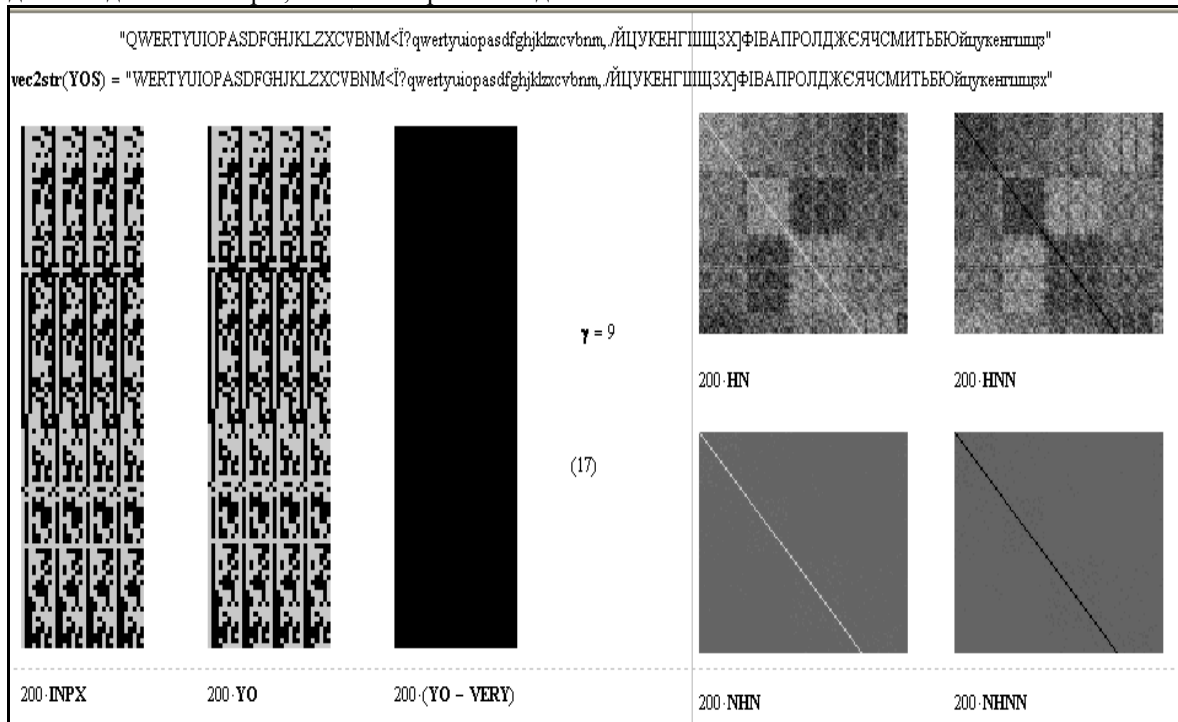


Рисунок 5. Результати моделювання БГАП на основі ВМЕ у вигляді результуючих зображень та різницевого (третє зліва у вигляді нульової матриці) зображення, що підтверджує успішне асоціювання усіх 100 векторів

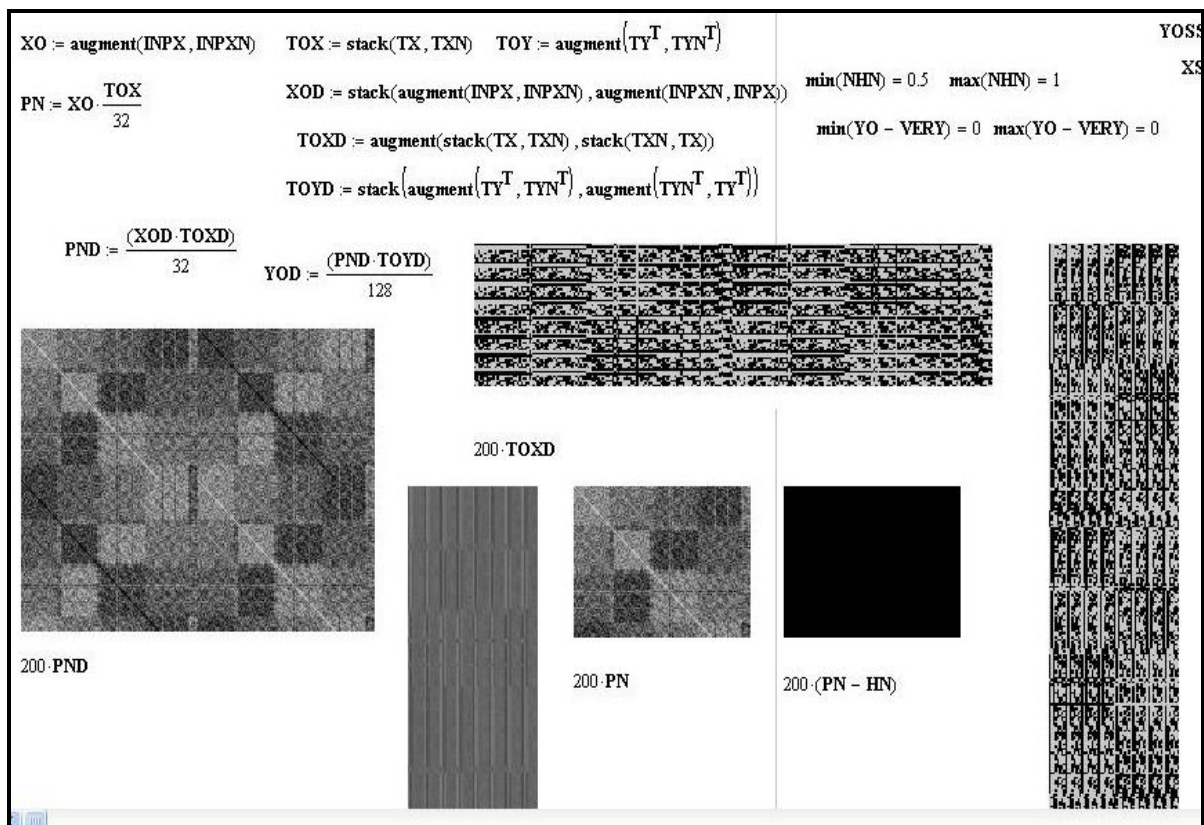


Рисунок 6. Результати моделювання БГАП на основі ВМП

III. ВИСНОВКИ

В результаті розроблення та моделювання БГАП, що функціонують на основі еквівалентних моделей, було підтверджено можливості реалізації БГАП на базі таких апаратно-програмних прискорювачів з паралельною обробкою, як векторно-матричні перемножувачі та векторно-матричні еквівалентори (по суті 2 перемножувача), які додатково до виконання ними паралельно лінійно-алгебраїчних процедур-операцій були наділені можливістю виконання ними паралельно по-компонентних нелінійних перетворень.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] M.T. Hagan, B. D. Howard, M.B. Hudson. Neural Network Design. Chapter 13. *PWS Publ. Company*. 1996. – С. 13–37.
- [2] J. A. Anderson. An Introduction to Neural Networks. Chapter 6-7. *MIT Press*. 1997. С. 143–208.
- [3] S. O. Haykin. Neural Networks and Learning Machines. *Prentice Hall*. 2009. №3 .
- [4] S. Grossberg. Nonlinear neural networks: Principles, mechanisms, and architectures. *Neural Networks*. 1988. № 1. С. 17–61.
- [5] O. Rudenko, E.V. Bodyansky. Artificial neuron networks: Handbook. Kharkiv : SMIT, 2005.
- [6] J. J. Hopfield. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc. Natl. Acad. Sci*. 1982. № 79. С. 2554–2558.
- [7] B. Kosko. Bi-directional associative memories. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1988. № 18. С. 49–60.
- [8] B. Kosko. Constructing an associative memory. 1987. № 12. С. 137–144.
- [9] Optical associative memory for high-order correlation patterns / B. Kiselyov, N. Kulakov, A. Mikaelian, V. Shkitin. *Opt. Eng.* 1995. № 31. С. 764–767.
- [10] A. A. Frolov and I. P. Husek. Muraviev Informational efficiency of sparsely encoded Hopfield-like associative memory. *Optical Memory & Neural Networks*. 2003. № 12. С. 177–197.
- [11] A. A. Frolov, D.A. Rachkovskij, D. Husek. On information characteristics of Willshaw-like auto-associative memory. *Neural Network World*. 2002. № 12. С. 141–157.
- [12] V. G. Krasilenko, A. T. Magas. Multiport optical associative memory based on matrix-matrix equivalentors. *Proceedings of SPIE (SPIE, Bellingham, WA)*. 1997. № 3055. С. 137–146..
- [13] The concept models and implementations of multiport neural net associative memory for 2D patterns / V. G. Krasilenko, A. I. Nikolsky, R. A. Yatskovskaya, V. I. Yatskovsky. *Optical Pattern Recognition XXII, Proceedings of SPIE (SPIE, Bellingham, WA)*. 2011. № 8055.
- [14] V. G. Krasilenko, A. A. Lazarev, S. K. Grabovlyak. Design and simulation of a multiport neural network heteroassociative memory for optical pattern recognitions. *SPIE*. 2012. № 8398.
- [15] On a model of associative memory with huge storage capacity / M. Demircigil, J. Heusel, M. Lowe та ін. *J. Stat. Phys*. 2017. № 168. С. 288–299.
- [16] A comparative study of sparse associative memories / V. Gripon, J. Heusel, M. Lowe, F. Vermet. *Journal of Statistical Physics*. 2016. № 164. С. 105–129.
- [17] V. Gripon, M. Lowe, F. Vermet. Associative memories to accelerate approximate nearest neighbor search. *Appl. Sci*. 2018. № 8.
- [18] D. Krotov, J. J. Hopfield. Dense associative memory for pattern recognition. *Advances in Neural Information Processing Systems 29*. 2016. С. 1172–1180.
- [19] D. Krotov, J. J. Hopfield. Dense associative memory is robust to adversarial inputs. *Neural Computation*. 2018. № 30. С. 3151–3167.
- [20] A. Mazumdar, A. S. Rawat. Associative memory using dictionary learning and expander decoding. *Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2017. С. 267–273.
- [21] Hardware implementation of associative memories based on multiple-valued sparse clustered networks / N. Onizawa, H. Jarollahi, T. Hanyu, W. J. Gross. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. 2016. № 6. С. 13–24.
- [22] V. G. Krasilenko, A. E. Nikolsky, Y. A. Flavitskay. The structures o Optical Neural Nets Based on New Matrix – Tensor Equivalental Models (MTEMS) and Results of Modeling. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2010. № 19. С. 31–38.
- [23] V. G. Krasilenko, A.A. Lazarev, D.V. Nikitovich. Design and simulation of optoelectronic neuron equivalentors as hardware accelerators of self-learning equivalent convolutional neural structures (SLECNS). *Proc. SPIE 10689, Neuro-inspired Photonic Computing*. 2018. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2316352>

Моделювання надшвидкого аварійного охолодження стінки корпусу реактора ВВЕР-1000

Вячеслав Попов
ТОВ «Експертний центр»
м. Київ, Україна

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.038>
Олександр Тригуб
Кафедра інформатики
НаУКМА
м. Київ, Україна
oleksandr.tryhub@ukma.edu.ua

Віктор Мілейковський
Кафедра теплогазопостачання і вентиляції
КНУБА
м. Київ, Україна

Анотація—Військова агресія РФ, окупація Запорізької АЕС, ракетні обстріли України актуалізують моделювання можливих нових надпроектних режимів реакторних установок. Таке моделювання і відповідний прогноз наслідків для радіаційного ресурсу корпусу реактора ВВЕР-1000 представлені в даній роботі. Моделювання виконане на основі реального режиму АЕС, що мав місце.

Ключові слова—атомна електростанція; вододіючий енергетичний реактор (ВВЕР-1000); корпус реактора; радіаційне окрихнення металу; міцність; аварійний режим; математичне та комп'ютерне моделювання.

I. ВСТУП

Питання радіаційної безпеки в Україні є вкрай важливими. У 1986 році в Україні трапилась найбільша за всю історію людства аварія на атомній електричній станції (Чорнобильська АЕС). Для порівняння, аварія на АЕС Фукусіма-1 (Японія, 2011 рік) за радіаційними наслідками становила лише 10% від аварії на Чорнобильській АЕС.

В результаті військової агресії з боку Росії під тимчасовою окупацією опинилась Запорізька АЕС. Достеменно невідомі технічні нюанси «керування» даною станцією з боку окупаційної адміністрації. З відкритих джерел інформації неодноразово повідомлялось про порушення певних регламентованих норм експлуатації станції, зокрема, не виключене надшвидке аварійне охолодження корпусу реактора. Саме моделюванню цього процесу [1], [2] і присвячена дана робота, адже можливі наслідки подібного «керування» можуть принести багато шкоди суспільству.

II. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості реального об'єкту для даного дослідження обрано корпус реактора ВВЕР-1000 енергоблоку № 1 Південноукраїнської АЕС [3] і режим, що мав місце там 22 жовтня 1985 року зі швидкістю охолодження першого контуру 1800

°С/годину [4]. В подальшому даний режим позначено як «22.10.85» (за датою події).

Оцінимо наслідки даного режиму для радіаційного ресурсу корпусу реактора ВВЕР-1000 і циклічної пошкоджуваності його металу. Базовим процесом в даному випадку є охолодження стінки, яке змодельоване залежним від часу охолоджуючим потоком $q(t)$, Вт/м² по певному закону. Результати моделювання охолоджуючого потоку показані на рис. 1.

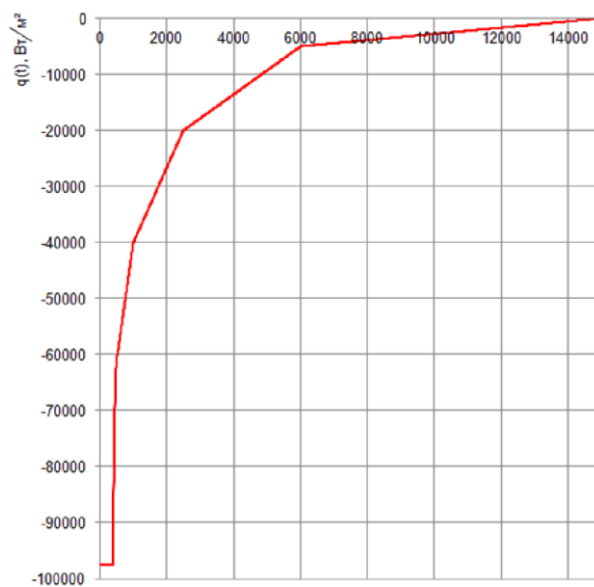


Рисунок 1. Графік потоку $q(t)$, Вт/м², прийнятий для моделювання охолодження внутрішньої поверхні стінки корпусу реактора для режиму «22.10.85» [4]

Для даного режиму отримані результати розрахункового моделювання нестационарної теплопровідності через стінку корпусу реактора на рівні зварювального з'єднання № 3. Сценарій зміни температури в стінці корпусу реактора визначено розв'язанням задачі нестационарної теплопровідності методом скінчених різниць з

прогінними коефіцієнтами. Даний сценарій зміни градієнту температур приведено на рис. 2.

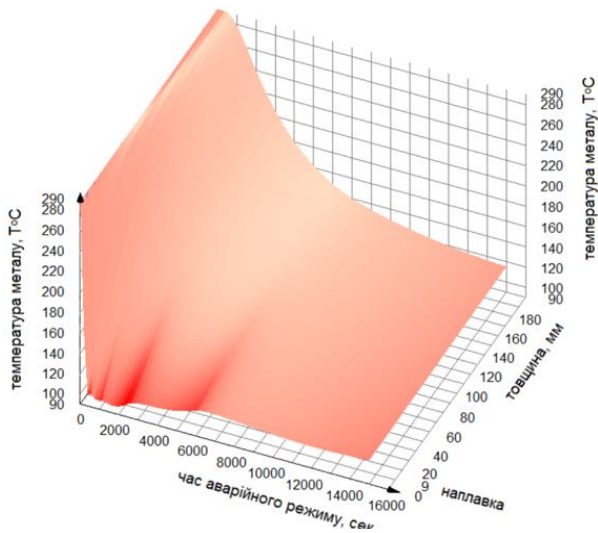


Рисунок 2. Зміна температури металу корпусу реактора ВВЕР-1000 для аварійного режиму «22.10.85» [4]

На рис. 3 та рис. 4 наведені результати оцінки циклічної пошкодженості [5] і радіаційного ресурсу металу корпусу реактора [3], [5–7] на рівні зварювального з'єднання № 3.

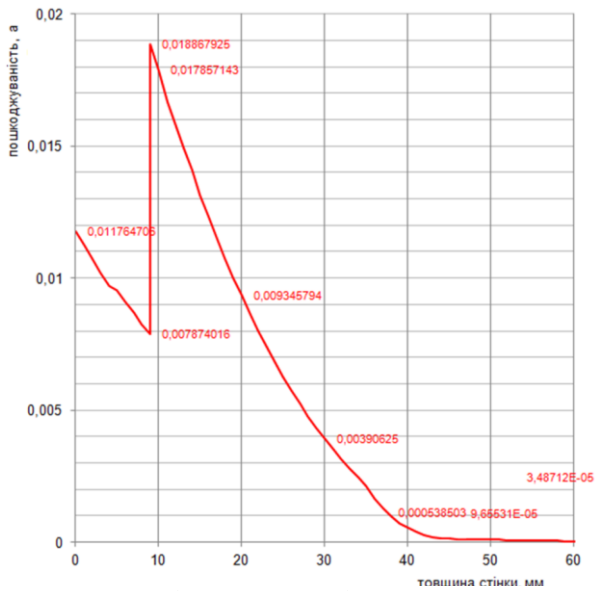


Рисунок 3а. Циклічна пошкодженість для режиму «22.10.85» на рівні зварювального з'єднання № 3 для товщини від 0 мм до 60 мм

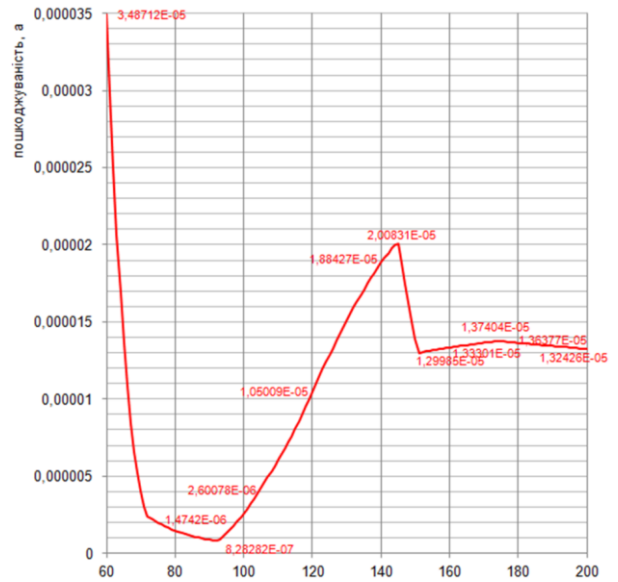


Рисунок 3б. Циклічна пошкодженість для режиму «22.10.85» на рівні зварювального з'єднання № 3 для товщини від 60 мм до 200 мм

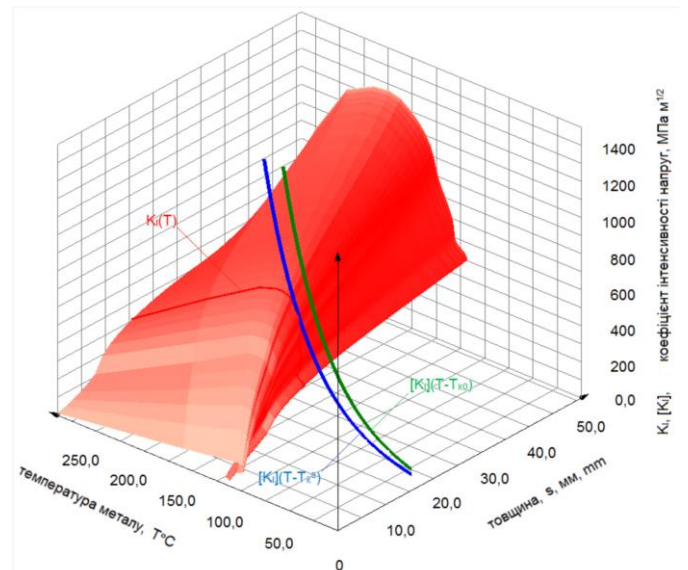


Рисунок 4а. Результати оцінки опору крихкому руйнуванню корпусу реактора для режиму «22.10.85»

Прогноз ресурсу для глибини металу 15,45 мм: 2,91 років.
 Параметри тріщини $a/c = 0,2$. Глибина тріщини $a = 50$ мм. Осьова тріщина.

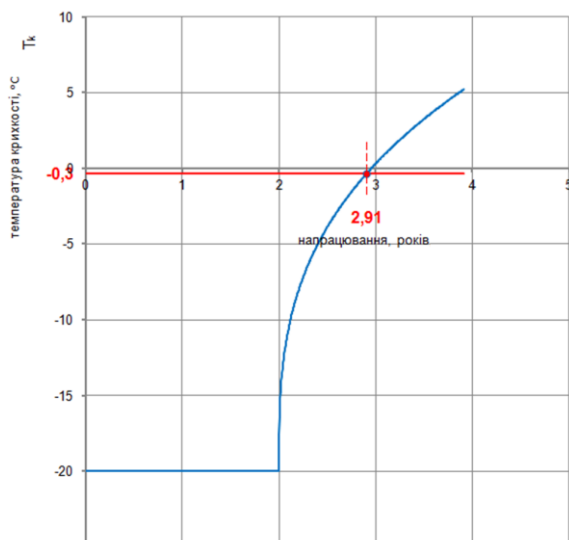


Рисунок 46. Результати оцінки радіаційного ресурсу корпусу реактора для режиму «22.10.85»

Результати проведеного розрахункового моделювання демонструють вельми негативні наслідки надшвидкого аварійного охолодження стінки корпусу реактору ВВЕР-1000, а саме: при проектному ресурсі 40 років його радіаційний ресурс зменшується до менш ніж 3-х років. Ці розрахунки можуть бути уточнені в разі отримання даних щодо можливих аварійних режимів ядерної установки внаслідок окупації. Отже, після перемоги необхідні додаткові дослідження на Запорізькій

АЕС для остаточної перевірки і, в разі потреби, модернізації систем безпеки ядерної установки.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] В. В. Попов, О. С. Тригуб, В. Мілейковський. Експертне експрес-оцінювання впливу тепломасообмінних процесів на залишковий ресурс корпусу реактора ВВЕР-1000 через циклічну пошкоджуваність. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання* : збірник. 2021. № 39. С. 6–28.
- [2] В.В. Попов, О. С. Тригуб, В. Мілейковський. Експертне експрес-оцінювання впливу тепломасообмінних процесів на залишковий ресурс корпусу реактора ВВЕР-1000 через окрихнення його металу. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання* : збірник. 2022. № 41. С. 39–49.
- [3] L. I. Chyrko. Porivniannia ukrainskoho ta rosiiskoho pidkhodiv do vyznachennia parametriv okrykhchuvannia metalu korpusiv reaktoriv. *Tezy dopovidei XIX shchorichnoi naukovoï konferentsii Instytutu yadernykh doslidzhen NAN Ukrainy 24–27 sichnia 2012*, Kyiv, Ukraina. 2012. С. 95–96.
- [4] E. Ya. Simonov. Prodlenie stroka ekspluatatsii reaktornykh ustanovok AES, vyrabotavshikh resurs, sooruzhenie novykh AES – opasnaia tekhnicheskaia avantiura. *Atomna enerhetyka v Ukraini*. 2007.
- [5] Норми розрахунку на міцність обладнання та трубопроводів атомних енергетичних установок ПНАЕ Г-7-002-86.
- [6] Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants. *International Atomic Energy Agency*. 2006.
- [7] G. Glinka. Development of weight functions and computer integration procedures for calculating stress intensity factors around cracks subjected to complex stress fields. *Progress Report : Stress and Fatigue-Fracture Design*. Ontario, 1996.

Ортогональна система тригонометричних функцій із змінним періодом та деякі її властивості

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.039>

Микола Приймак

Кафедра комп'ютерних наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

м. Тернопіль, Україна

pmw.ukr@ukr.net

Abstract—Звернуто увагу на наявність періодичних сигналів із змінним періодом та відсутність методів їх дослідження. Наведено визначення періодичних функцій із змінним періодом, які можуть бути використані як моделі згаданих сигналів. Розглянуто деякі властивості таких функцій, зокрема побудована ортогональна система тригонометричних функцій із змінним періодом, що є основою побудови їх рядів Фур'є.

Keywords—змінний період; періодичні функції із змінним періодом; ортогональна система тригонометричних функцій із змінним періодом; ряди Фур'є періодичних функцій із змінним періодом

I. ВСТУП

В прикладних дослідженнях часто виникає потреба побудови рядів Фур'є періодичних сигналів і вирішення на цій основі певних задач. Наприклад, в акустиці, гідроакустиці, радіолокації важливими є задачі виявити та розпізнати джерела періодичних сигналів, визначити їх амплітудний і фазовий спектри, обчислити віддаль до цих, визначити їх місцезнаходження, швидкість та напрямок переміщення тощо. Спектральний аналіз широко використовуються при дослідженні астрономічних явищ рентгенівського типу. Для періодичних сигналів, моделлю яких є періодичні функції, теорія та методи їх аналізу розроблені достатньо різносторонньо [1; 2].

Проте крім періодичних сигналів в традиційному розумінні цього поняття зустрічаються 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, наприклад, фізичного навантаження, звук сирени повітряної тривоги, сирени швидкої допомоги тощо.

Наявність періодичних сигналів із змінним періодом генерує природне питання, яким чином їх досліджувати. Огляд літературних джерел показує, що до недавніх пір будь-якої теорії і методів вивчення згаданих сигналів не існувало. Що стосується тематики цієї доповіді, то для вирішення задач, подібних до згаданих вище, в першу чергу до побудови рядів Фур'є періодичних сигналів із

змінним періодом, найперше необхідна наявність певної ортогональної системи функцій. Щоб перейти до розгляду такої системи, нагадаємо перші кроки на шляху виникнення і розвитку теорії періодичних функцій із змінним періодом, які розглядаються як моделі відповідних сигналів.

II. ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДИЧНОЇ ФУНКЦІЇ ІЗ ЗМІННИМ ПЕРІОДОМ

Вперше визначення таких функцій було подано в роботі [3].

Означення. Функція $f(x)$, $x \in I \subseteq \mathbb{R}$, називається періодичною із змінним періодом $T(x)$, якщо для всіх x , таких, що $x \in I$ та $x + T(x) \in I$, виконується рівність

$$f(x) = f(x + T(x)). \quad (1)$$

В частинному випадку, коли $T(x) = T = \text{const}$, із (1) видно, що f є періодичною функцією з періодом T .

Приклад змінного періоду $T(x)$ показано на рисунку 1. В точці x_1 період рівний $T(x_1)$, тобто значення функції в точках x_1 і $x_1 + T(x_1)$ повторюються: $f(x_1) = f(x_1 + T(x_1))$. В точці x_2 період рівний $T(x_2)$.

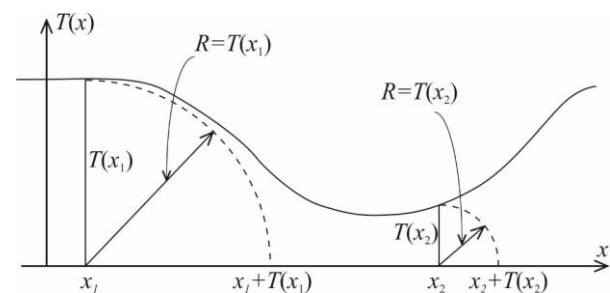


Рисунок 1. Змінний період $T(x)$, його значення в точках

x_1 і x_2

III. ЗМІННИЙ ПЕРІОД $T^-(x)$.

Для періодичної функції $g(x)$ з постійним періодом T виконується рівність $g(x) = g(x+T) = g(x-T)$. Нескладні міркування, зокрема звернення до рисунку 1, показують, що для функції $f(x)$ із змінним періодом $T(x)$ аналогічна рівність $f(x) = f(x+T(x)) = f(x-T(x))$ в загальному не виконується. Тому для випадку, коли аргумент x зменшується, введено змінний період, який позначається через $T^-(x)$, і такий що

$$f(x) = f(x - T^-(x)). \quad (2)$$

IV. АНАЛІТИЧНЕ ЗАДАННЯ ФУНКЦІЙ ІЗ ЗМІННИМ ПЕРІОДОМ

Найпростішими періодичними функціями із змінним періодом є тригонометричні функції

$$\sin x^\alpha, \cos x^\alpha, x \in I = [0, \infty), \alpha > 0, \quad (3)$$

вперше розглянуті в роботі [4]. При $\alpha = 1$ отримуємо звичайні тригонометричні функції. Обмеження на аргумент x викликане тим, що при $x < 0$ в залежності від того, яким є параметр α , парним чи непарним, змінюється область I . Будемо вважати, що область $I = [0, \infty)$.

Приклад. На рисунку 2 зображена функція $f_1(x) = \sin x^{3/4}, x \geq 0$, (графік 1) та для порівняння функція $f_2(x) = \sin x$ (графік 2).

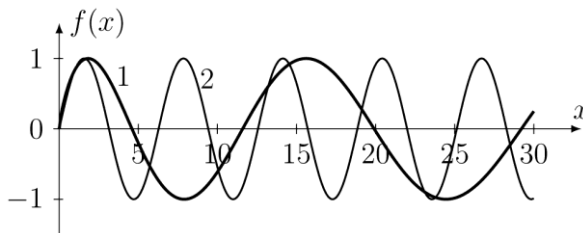


Рисунок 2. Функція $f_1(x) = \sin x^{3/4}$ (графік 1), $f_2(x) = \sin x$ (графік 2).

Аналізуючи графіки, видно, що функція $f(x) = \sin x^{3/4}$, із зростанням аргументу «розтягується», тобто її період збільшується.

V. ЗМІННІ ПЕРІОДИВ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ

Для тригонометричних функцій (3) їх змінний період вперше були записані в [5], і виражається формулами

$$T(x) = -x + (x^\alpha + 2\pi)^{1/\alpha}, \alpha > 0, x \in [0, \infty). \quad (4)$$

$$T^-(x) = x - (x^\alpha - 2\pi)^{1/\alpha}, \alpha > 0, x \in [T(0), \infty). \quad (5)$$

Приклад. Для функції $\sin x^{3/4}$ їх змінні періоди на основі формул (3) і (4) набувають вигляду

$$T_{3/4}(x) = -x + (x^{3/4} + 2\pi)^{4/3}, x \geq 0,$$

$$T_{3/4}^-(x) = x - (x^{3/4} - 2\pi)^{4/3}, x \geq (2\pi)^{4/3} \approx 11.594.$$

Графіки цих періодів показані на рисунку 3. Для порівняння також наведений період функції $\sin x$: $T = 2\pi$.

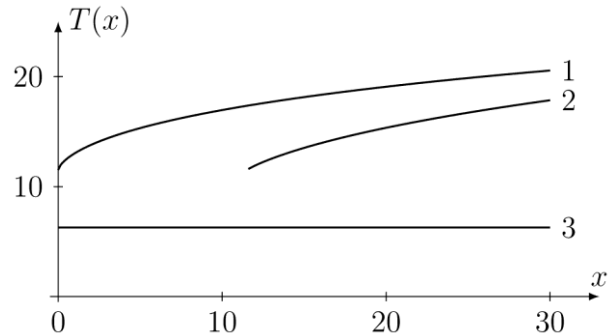


Рисунок 3. Змінні періоди для функції $\sin x^{3/4}$: $T_{3/4}(x)$, (графік 1); $T_{3/4}^-(x)$, (графік 2). Для порівняння період $T = 2\pi$ для функції $\sin x$ (графік 3).

VI. ОРТОГОНАЛЬНА ТРИГОНОМЕТРИЧНА СИСТЕМА ФУНКЦІЙ ІЗ ЗМІННИМ ПЕРІОДОМ

Подібно до тригонометричної системи функцій $1, \sin kx, \cos kx, k = 1, 2, \dots$,

що є ортогональною на довільному інтервалі довжиною 2π , виникає природне питання щодо існування ортогональних системи тригонометричних функцій із змінним періодом. Вперше це питання розглядалося в [6]. В пізніших роботах автора підняті вище питання розглядалися більш детально.

Звернемось до базових тригонометричних функцій (3), змінні періоди яких виражається формулами (4) і (5). На основі цих функцій утворимо систему функцій

$$1, \sin kx^\alpha, \cos kx^\alpha, \alpha > 0, x \in I, k = 1, 2, \dots \quad (6)$$

Для системи (6) має місце наступна теорема.

Теорема 1. Система тригонометричні функції (6), змінний період якої $T(x) = -x + (x^\alpha + 2\pi)^{1/\alpha}$, є ортогональною із ваговою функцією $\rho(x) = (x^\alpha)' = \alpha x^{\alpha-1}$ на довільному інтервалі $[x, x + T(x)]$, тобто скалярний добуток різних функцій системи (3) рівний нуль, для однакових функцій їх скалярний добуток рівний π .

Наприклад, для різних функцій $\sin mx^\alpha, \sin nx^\alpha, m \neq n$, скалярний добуток

$$(\sin mx^\alpha, \sin nx^\alpha) = \alpha \int_x^{x+T(x)} x^{\alpha-1} \sin mx^\alpha \sin nx^\alpha dx = 0, m \neq n, \quad (7)$$

Для однакових функцій, наприклад, для $\sin mx^\alpha, \sin mx^\alpha$, скалярний добуток

$$(\sin mx^\alpha, \sin mx^\alpha) = \alpha \int_x^{x+T(x)} x^{\alpha-1} \sin^2 mx^\alpha dx = \pi, m = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Доведення теореми опускається.

З формули (8) виходить, що норма кожної із функцій системи (3) рівна $\sqrt{\pi}$:

$$\|\cos kx\| = \|\sin kx\| = \sqrt{\pi}, k = 1, 2, \dots$$

Зауваження 1. Звернемо увагу, що довжина інтервалу ортогональності $[x, x+T(x)]$, $x \geq 0$, є змінною і залежить від його розміщення на області визначення I , точніше, від значення змінного періоду $T(x)$ в крайній лівій точці інтервалу.

Зауваження 2. Ортогональна система $1, \sin kx^\alpha, \cos kx^\alpha, k = 1, 2, \dots$, є базою побудови рядів Фур'є періодичних функцій із змінним періодом, змінний період яких співпадає із періодом

ортогональної системи, що виражається формулою (4).

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. Москва : Наука, 1976. 544 с.
- [2] Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва : Радио и связь, 1986. 512 с.
- [3] Приймак М. В., Боднарчук І. О., Лупенко С. А. Умовно періодичні випадкові процеси із змінним періодом. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2005. № 10. С. 132–141.
- [4] Приймак М. В. Періодичні функції із змінним періодом. *Матеріали одинадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ, 2007. С. 70.
- [5] Приймак М. В. Змінні періоди деяких періодичних функцій із змінним періодом. *Матеріали одинадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ, 2007. С. 71.
- [6] Приймак М. В. Ортогональні системи періодичних функцій із змінним періодом. *Матеріали одинадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя*. Тернопіль : ТДТУ, 2007. С. 72.

Оцінка варіабельності серцевого ритму на основі періодичних функцій із змінним періодом

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.040>

Микола Приймак

Кафедра комп'ютерних наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

м. Тернопіль, Україна

pmw.ukr@ukr.net

Анотація—введено поняття варіабельності серцевого ритму та вказано, що основним об'єктом її дослідження є періоди (частота) серцебиття. Відзначено, що для випадків, коли періоди утворюють стаціонарну послідовність, методи аналізу варіабельності розроблені. Основна увага в доповіді приділена вивченню варіабельності після дії на організм певних збудників спокою, наприклад, фізичного навантаження. Для таких випадків на основі періодичних функцій із змінним періодом отримана аналітична оцінка змінного періоду серцебиття та оцінка аритмії, а параметри оцінок запропоновано використовувати як діагностичні ознаки варіабельності.

Ключові слова—серцевий ритм; варіабельність; періодична функція із змінним періодом; змінний період серцебиття; змінна частота серцебиття; оцінка аритмії.

I. ВСТУП. ПОНЯТТЯ ТЕРМІНУ ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ СЕРЦЕВОГО РИТМУ

В літературі зустрічаються різні за об'ємом та деталізацією тлумачення слова варіабельність. Досить широко цей термін використовується в кардіології. Усреднюючи певні розбіжності в поняття цього слова, його визначення подамо таким чином: «Варіабельність серцевого ритму – це змінність (нерівномірність) серцевих скорочень».

Для наочного тлумачення варіабельності звернемось до електрокардіограми (ЕКГ), фрагмент якої подано на рисунку 1. Графічно ЕКГ виглядає як крива лінія, що має окремі локальні піки. Їх прийнято називати зубцями ЕКГ та позначати літерами латинського алфавіту P, Q, R, S, T, U. Часові відстані між окремими зубцями називаються інтервалами. Віддалі (між послідовно зареєстрованими R-зубцями називаються R-R інтервалами. Окремий R-R інтервал є періодом (тривалістю) одного серцевого циклу в секундах.

Спостерігаючи за поведінкою R-R інтервалів, на перших порах може вважатися, що ЕКГ є періодичною функцією. Проте більш точні вимірювання R-R інтервалів показують, що період ЕКГ не є постійним, а певним чином змінюється, причому ця зміна має випадковий

характер. Такі змінні періоди в електрокардіографії ще називають серцевим ритмом.

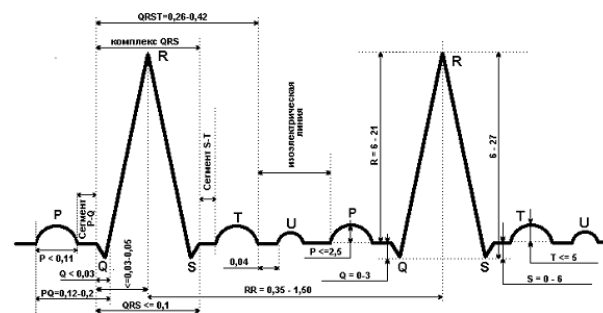


Рисунок 1. Елементи ЕКГ та їх характеристики

Враховуючи це зауваження, визначення варіабельності подамо ще таким чином. Варіабельність – це змінність періодів ЕКГ (серцебиття). Дослідження цієї змінності, тобто варіабельності ЕКГ, є однією із важливих задач в кардіології.

Коли R-R інтервали вимірюються в стані спокою, вважається, що вони утворюють стаціонарну послідовність. Методи дослідження стаціонарних ЕКГ розроблені досить різносторонньо. Проте крім стаціонарних випадків важливою є задача дослідження ЕКГ, що отримується після дії на організм збудника спокою, наприклад, фізичного навантаження, тобто коли послідовність її періодів вже не є стаціонарною. Для таких ЕКГ науково обґрунтованих методів і алгоритмів їх дослідження до недавнього часу не існувало. Така можливість появилась порівняно недавно, після започаткування теорії періодичних функцій із змінним періодом [1].

II. ЗНАХОДЖЕННЯ ЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДА – ОДНА ІЗ НАУКОВИХ ПРОБЛЕМ

Коли мова заходить про періодичність, в першу чергу про періодичні аналітичні функції та їх ряди Фур'є, то, як правило, припускається, що період функцій є відомим. Якщо ж розглядаються питання досліджень реальних періодичних сигналів, то їх період переважно невідомий. Тому щоб здійснювати

їх аналіз, спочатку необхідно знайти значення періода.

III. ЗМІННИЙ ПЕРІОД ТА ЗАДАЧА ЙОГО ВИЗНАЧЕННЯ

Такі ж зауваження стосуються і періодичних функцій із змінним періодом. Для аналітично заданих функцій їх змінний період $T(t)$ вважається відомим. Для реальних сигналів, а такими є сирена швидкої допомоги, повітряної тривоги, електрокардіограма після дії на організм певного збудника спокою, знання їх змінного періоду скоріше є винятком, ніж закономірністю. При дослідженні цих та інших подібних сигналів однією із перших є задача знаходження їх змінного періоду.

Побудову оцінки змінного періоду розглянемо на прикладі оцінки періоду серцебиття після дії на організм пацієнта фізичного навантаження у вигляді фіксованого числа присідань. Деякі із цих питань розглядалися автором цієї роботи раніше [2; 3].

Метод оцінки змінного періоду умовно розділимо на два етапи. Спочатку проводяться експеримент та відбір необхідних даних, пізніше у вигляді функціональних залежностей знаходиться оцінка змінного періоду та змінної частоти.

A. Відбір експериментальних даних змінного періоду

На першому етапі експерименту пацієнт піддається фізичному навантаженню (наприклад, двадцять глибоких присідань). Зразу ж після присідання здійснюється відбір моментів часу $t_k, k=1,2,\dots,n+1$, в які з'являються R-зубці електрокардіограми. На основі цієї послідовності утворюємо послідовність

$$T_k = t_{k+1} - t_k, k=1,2,\dots,n.$$

Значення T_k – це по суті величина змінного періоду $T(t)$ в моменти часу $t_k, k=1,2,\dots,n$. За значеннями змінного періоду T_k обчислюються значення змінної частоти $\nu_k = 1/T_k$, яку образно називають частотою серцебиття. Кожне десяте значення періодів T_k та частот ν_k показані на рисунку 1.

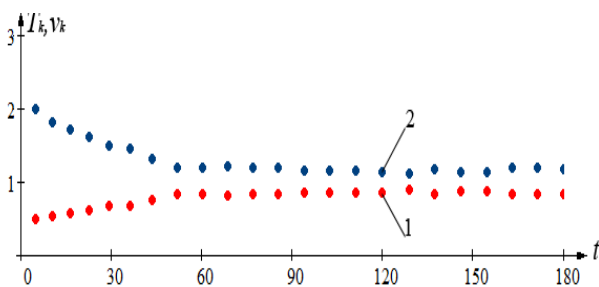


Рисунок 1. Кожне десяте значення змінного періоду T_k , (графік

1) та змінної частоти ν_k (графік 2), отримані після дії на організм фізичного навантаження

B. Апроксимація експериментальних даних як метод оцінки змінного періоду

Для знаходження функціонального виразу оцінки змінного періоду $T(t)$ використаємо метод апроксимації. Нагадаємо, що суть апроксимації числової послідовності полягає в побудові такої неперервно заданої функції, яка б найбільш точно («найкращим» чином) відтворювала загальну динаміку (закономірність) поведінки цієї послідовності. В нашому випадку для апроксимації може бути вибрана послідовність змінного періоду $T_k, k=1,2,\dots,n$, або змінної частоти ν_k . Вирішення цієї задачі теж розіб'ємо на два етапи. Спочатку здійснюється вибір класу функцій, до якого відноситься апроксимуюча функція. На другому етапі визначаються коефіцієнти та параметри цієї функції.

B. Вибір апроксимаційної функції

Проведемо попередній аналіз значень періоду T_k та частоти ν_k , графіки яких показані на рисунку 1. Аналізуючи поведінку значень T_k , видно, що вказати клас функцій, представник якого дозволив би відтворити закономірність цієї поведінки, досить проблематично. Якщо звернути увагу на динаміку значень частоти ν_k , видно, що їх поведінка має форму експоненційної залежності. Звідси виходить, що доцільно провести апроксимацію послідовності $\nu_k, k=1,2,\dots,n$, а за апроксимаційну функцію вибрати експоненційну функцію

$$\nu(t) = a + be^{-\alpha t} = \nu(t, a, b, \alpha), t \geq 0. \quad (1)$$

Г. Знаходження параметрів апроксимаційної функції $\nu(t)$.

Для їх знаходження параметрів a, b, α функції $\nu(t)$ використаємо метод найменших квадратів. Для цього через S_v^2 позначимо суму квадратів різниць (відхилень) між значеннями частот $\nu_k, k=1,2,\dots,n$, та відповідними значеннями функції апроксимації $\nu(t)$ в точках t_k

$$S_v^2 = \sum_{k=1}^n (\nu_k - \nu(t_k))^2 = \sum_{k=1}^n (\nu_k - (a + be^{-\alpha t_k}))^2 \stackrel{df}{=} S_v^2(t_k, a, b, \alpha). \quad (2)$$

В цій сумі значення частоти ν_k є відомими, а параметри a, b, α розглядаються як змінні величини. Згідно методу найменших квадратів параметри a, b, α знаходяться із умови мінімізації суми:

$$\inf_{a, b, \alpha} \sum_{k=1}^n (\nu_k - (a + be^{-\alpha t_k}))^2 = \inf_{a, b, \alpha} S_v^2(t_k, a, b, \alpha), \quad (3)$$

де нижня границя розповсюджується на всі значення параметрів a, b, α .

Д. Оцінка змінного періоду та змінної частоти

Знайдені із (3) значення параметрів a, b і α підставимо їх вираз (1). В результаті отримаємо апроксимуючу функцію змінної частоти

$$v(t) = a + be^{-\alpha t},$$

яка і приймається за оцінку змінної частоти. Оскільки період і частота обернено пропорційно пов'язані, функцією апроксимації змінного періоду є функція

$$T(t) = \frac{1}{v(t)} = \frac{1}{a + be^{-\alpha t}},$$

яка приймається за оцінку змінного періоду.

Е. Міра відхилення функції апроксимації від експериментальних даних

Якщо отримані значення параметрів a, b, α підставити у вираз (2), то величина

$$S_v^2 = \sum_{k=1}^n (v_k - (a + be^{-\alpha t_k}))^2$$

визначає степінь наближення функції апроксимації $v(t)$ до експериментальних даних. Величину S_v^2 назвемо мірою (оцінкою) квадратичного відхилення функції апроксимації частоти $v(t)$ від експериментальних значень. По аналогії з поняттям дисперсії величина $\sigma_v^2 = S_v^2/n$ буде «дисперсійним» відхиленням апроксимації частоти. Крім відхилень S_v^2 і σ_v^2 більш зручно користуватися середньоквадратичним відхиленням

$$\sigma_v = \sqrt{S_v^2/n}.$$

Мірою квадратичного відхилення функції апроксимації $T(t)$ від значень $T_k, k = 1, 2, \dots, n$, буде величина

$$S_T^2 = \sum_{k=1}^n (T_k - T(t_k))^2 = \sum_{k=1}^n \left(T_k - \frac{1}{a + be^{-\alpha t_k}} \right)^2.$$

Відповідне їй середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_T = \sqrt{S_T^2/n}.$$

IV. ПАРАМЕТРИ ЗМІННОЇ ЧАСТОТИ ТА ПЕРІОДУ ЯК ДІАГНОСТИЧНІ ОЗНАКИ

Параметри a, b, α а також середньоквадратичні відхилення σ_v і σ_T пропонується використовувати в кардіології як діагностичні ознаки для задач розпізнавання, класифікації та інше.

Приклад. За тематикою цієї доповіді було проведено ряд експериментальних досліджень, пов'язаних із оцінкою змінного періоду і частоти серцебиття пацієнтів після фізичного навантаження. Результати опрацювання даних для двох експериментів, учасники яких відносилися до різних вікових категорій, наведені в таблиці 1.

ТАБЛИЦЯ 1

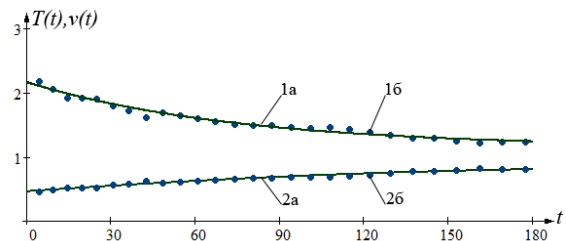
	a	b	α	σ_v	σ_T
Експеримент 1	1,148	1,015	0,013	0,041	0,016
Експеримент 2	1,231	1,407	0,036	0,039	0,022

За обчисленими значеннями параметрів a, b, α аналітичні оцінки (апроксимаційні функції) змінної частоти $v(t)$ та змінного періоду $T(t)$ для першого експерименту мають вигляд:

$$v(t) = 1.148 + 1.015 \times e^{-0.013},$$

$$T(t) = \frac{1}{1.148 + 1.015 \times e^{-0.013}}.$$

На рисунку 2 наведені результати експерименту 1: оцінка змінної частоти $v(t)$ – графік 1а, експериментальні дані змінної частоти $v_k, k = 10, 20, \dots, 10n$ – точковий графік 1б; оцінка змінного періоду $T(t)$ – графік 2а; експериментальні дані змінного періоду T_k – точковий графік 2б.



Рисунку 2. Результати експерименту 1: змінна частота v_k – точковий графік 1а; оцінка змінної частоти $v(t)$ – графік 1б; змінний період T_k – точковий графік 2а; оцінка змінного періоду $T(t)$ – графік 2б

V. ВИКОРИСТАННЯ В МЕДИЧНІЙ ПРАКТИЦІ ПАРАМЕТРІВ a, b І α ТА ОЦІНОК ЗМІННОГО ПЕРІОДУ І ЧАСТОТИ

Можна вказати два основних напрямки використання оцінок змінного періоду і змінної частоти та параметрів a, b, α та середньоквадратичні відхилення σ_v і σ_T .

- При побудові рядів Фур'є періодичних сигналів із змінним періодом, коли змінний період є невідомим. Тому замість точного значення періоду може бути використана його оцінка.
- Для задач кардіології, зокрема при дослідженні варіабельності серцевого ритму.

А. Тлумачення параметрів a, b, α з позицій варіабельності серцевого ритму.

Параметри a, b, α мають чітку інтерпретацію при дослідженні варіабельності серцевого ритму після дії на організм дії збудника спокою.

- Параметр a означає частоту пульсу в стані спокою.
- Параметр b вказує, на яку величину зростає частота пульсу після дії на організм збудника спокою.
- Параметр α характеризує «швидкість» стабілізації серцебиття: при збільшенні значення α тривалість стабілізації зменшується і навпаки, на що звернемо увагу нижче.

Б. Тривалість стабілізації пульсу.

Важливою характеристикою варіабельності є тривалість стабілізації пульсу, тобто проміжок часу від моменту t_0 , коли розпочинався відлік R-R інтервалів (періодів T_k), до моменту часу t_1 , коли пульс стабілізується. За значення t_1 доцільно брати такий момент часу, коли різниця $v(t_1) - a \leq \varepsilon$. При цьому для $t < t_1$ різниця $v(t) - a > \varepsilon$, для $t > t_1$ різниця $v(t) - a < \varepsilon$. Вибір значення ε здійснюється на основі рекомендацій лікарів-кардіологів. Різницю $t_1 - t_0 = t_{cm}^{df}$ пропонується трактувати як тривалість стабілізації пульсу.

VI. ОЦІНКА АРИТМІЇ СЕРЦЕВОГО РИТМУ ПІСЛЯ ФІЗИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Ще одним показником варіабельності серцевого ритму є аритмія. В стані спокою, коли послідовність R-R інтервалів вважається стаціонарною, за величину аритмії приймається середньоквадратичне відхилення цієї послідовності від її математичного сподівання. У випадку дії на організм збудника

спокою послідовність R-R інтервалів відмінна від стаціонарної, тому така оцінка аритмії не підходить.

Для оцінки аритмії в подібних випадках пропонується алгоритм, що враховує відхилення значень періодів $T_k, k = 1, 2, \dots, n$ (R-R інтервалів) від оцінки змінного періоду $T(t)$. При цьому оцінкою (мірою, величиною) аритмії буде середньоквадратичне відхилення $\sigma_T = \sqrt{S_T^2/n}$.

Крім оцінки аритмії σ_T для задач кардіології пропонується використовувати оцінку аритмії частоти $v_k, k = 1, 2, \dots, n$, серцевих скорочень. Такою оцінкою може бути квадратичне відхилення частоти S_v^2 або середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_v = \sqrt{S_v^2/n}.$$

Значення σ_v і σ_T для розглянутих раніше експериментів подані в таблиці 1. Діагностичні висновки згідно цих оцінок аритмії можуть дати кардіологи.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Приймак М. В., Боднарчук І. О., Лупенко С. А. Умовно періодичні випадкові процеси із змінним періодом. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2005. № 10. С. 132–141.
- [2] Приймак М. В., Сарабун Р. М. Оцінка змінного періоду та змінної частоти серцебиття пацієнтів у різних вікових групах. *Природничі науки та інформаційні технології*: матеріали XIV наукової конференції Тернопільського національного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 27–28 жовтня 2010 р.). Тернопіль: ТНТУ, 2010. С. 29.
- [3] Приймак М. В., Сарабун Р. О., Дмитроца Л. П. Оцінка змінного періоду та змінної частоти. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2011. № 2. С. 76–82.

Комп'ютерне моделювання дифузії домішкової речовини з випадкового точкового джерела маси

<https://doi.org/10.31713/МСІТ.2023.041>

Петро Пукач

Кафедра обчислювальної математики і
програмування
Національний університет “Львівська політехніка”,
м. Львів, Україна
petro.y.pukach@lpnu.ua

Юрій Чернуха

Кафедра обчислювальної математики і
програмування
Національний університет “Львівська політехніка”,
м. Львів, Україна
yurii.a.chernukha@lpnu.ua

Анотація—Робота присвячена моделюванню дифузійних процесів у шарі за дії випадково розташованого точкового джерела. Досліджені варіанти розташування джерела за рівномірним і трикутним розподілом на певному проміжку, а також два часткові випадки бета-розподілу, які відповідають найімовірнішому знаходженню точкового джерела маси в околі верхньої або нижньої границі шару.

Ключові слова—математичне моделювання, дифузія, випадкове точкове джерело, ймовірнісний розподіл.

I. ВСТУП

Причиною розгляду шуканих функцій як випадкових при математичному описі фізичних процесів в об'єктах природного середовища, в елементах складних конструкцій або при створенні та функціонуванні композитних матеріалів тощо, є недостатність інформації про внутрішню багатозфазну або багатокомпонентну структуру тіла. Іншою причиною випадковості фізичних полів може бути дія випадкових джерел. У таких випадках потрібно враховувати задання статистики джерел, або статистики первинного поля.

У багатьох випадках в середині тіла діють джерела маси, які необхідно враховувати при дослідженні процесів масоперенесення та масообміну. Наприклад, процеси перенесення можуть супроводжуватися хімічними реакціями, наявні масові дефекти в ядрах атомів, в тілі відбуваються процеси кристалізації або танення і т.п. Задачі з точковими джерелами маси можуть виникати у різних галузях, наприклад, при аналізі руху та стійкості систем точкових мас, при наявності в тілі радіоактивного випромінювання, при необхідності враховувати гравітаційну взаємодію точкових мас, тощо. При цьому конкретне місце дії точкового джерела може бути невідомим.

У даній роботі розглядається крайова задача дифузії домішкової речовини в шарі при дії випадкового точкового джерела, коли ймовірнісний розподіл його розташування є рівномірним, трикутним або частковим випадком бета-розподілу.

II. ФОРМУЛЮВАННЯ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ ДИFUZІЇ З ВИПАДКОВОГО ТОЧКОВОГО ДЖЕРЕЛА

Розглянемо дифузію домішкової речовини в шарі товщини x_0 за дії у випадковій точці $x_s \in (0, x_0)$ точкового джерела маси потужності ω . Рівняння дифузії отримано на основі законів Фіка у вигляді [1, 2]

$$\rho \frac{\partial c(t, x)}{\partial t} = d \frac{\partial^2 c(t, x)}{\partial x^2} + \omega \delta(x - x_s), \quad (1)$$

де $c(t, x)$ – концентрація мігруючої речовини, ρ – густина тіла, d – кінетичний коефіцієнт перенесення, t – час, x – просторова координата, $\delta(x - x_s)$ – дельта-функція Дірака [3].

Нехай задано крайові умови першого роду. А саме, початкова умова є нульовою

$$c(t, x)|_{t=0} = 0, \quad (2)$$

на обох поверхнях шару підтримуються сталі значення концентрації частинок

$$c(t, x)|_{x=0} = c_0 \equiv const, \quad c(t, x)|_{x=x_0} = c_* \equiv const. \quad (3)$$

Наявність в системі випадкового точкового джерела маси спричинює стохастичність шуканої функції, тобто випадковість поля концентрації домішки.

III. ПОБУДОВА РОЗВ'ЯЗКУ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ ДИFUZІЇ З ВИПАДКОВОГО ДЖЕРЕЛА

Шукатимемо розв'язок крайової задачі (1) – (3) у вигляді суми розв'язку однорідної крайової задачі і згортки функції Гріна з випадковим джерелом [1]. Маємо

$$c(t, x) = c^h(t, x) + \omega \int_0^t \int_0^{x_0} G(t, t'; x, x') \delta(x' - x_s) dx' dt'. \quad (4)$$

Тут $c^h(t, x)$ – розв'язок однорідної крайової задачі:

$$\rho \frac{\partial c^h(t, x)}{\partial t} = d \frac{\partial^2 c^h(t, x)}{\partial x^2}, \quad (5)$$

$$c^h(t, x) \Big|_{t=0} = 0, \quad (6)$$

$$c^h(t, x) \Big|_{x=0} = c_0, \quad c^h(t, x) \Big|_{x=x_0} = c_*; \quad (7)$$

$G(t, t'; x, x')$ – функція Гріна неоднорідної задачі (1) – (3), яка за означенням є розв’язком задачі для рівняння

$$\rho \frac{\partial G}{\partial t} - d \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} = \delta(t - t') \delta(x - x') \quad (8)$$

з нульовою початковою умовою

$$G(t, t'; x, x') \Big|_{t=0} = 0 \quad (9)$$

та нульовими граничними умовами

$$G(t, t'; x, x') \Big|_{x=0} = 0, \quad G(t, t'; x, x') \Big|_{x=x_0} = 0. \quad (10)$$

Розв’язок однорідної крайової задачі (5) – (7) шукаємо зведенням її до задачі з нульовими граничними умовами і застосуванням інтегрального перетворення Лапласа за часовою змінною та скінченного інтегрального \sin -перетворення Фур’є за просторовою змінною [4]. В результаті одержимо

$$c^h(t, x) = c_0 \left(1 - \frac{x}{x_0} \right) + c_* \frac{x}{x_0} + \frac{2}{\rho x_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{y_n} \left((-1)^n c_* - c_0 \right) e^{-\frac{dy_n^2 t}{\rho}} \sin(y_n x), \quad (11)$$

де $y_n = n\pi/x_0$.

Функцію Гріна шукаємо, розв’язуючи крайову задачу (8) – (10) також із застосуванням інтегральних перетворень Лапласа та Фур’є. Функція Гріна отримана у вигляді

$$G(t, t'; x, x') = \frac{2}{x_0} \theta(t - t') \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{dy_n^2 (t-t')}{\rho}} \sin(y_n x) \sin(y_n x'), \quad (12)$$

де $\theta(t - t')$ – одинична сходинова функція Гевісайда [5].

IV. УСЕРЕДНЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗА ВИПАДКОВОЮ КООРДИНАТОЮ РОЗТАШУВАННЯ ДЖЕРЕЛА

Усереднимо функцію $c(t, x)$, яка є випадковим полем двох змінних. Врахуємо, що $c^h(t, x)$ – детермінована функція, тоді $\langle c^h(t, x) \rangle = c^h(t, x)$. Маємо

$$\langle c(t, x) \rangle = c^h(t, x) + \omega \left\langle \int_0^t \int_0^{x_0} G(t, t'; x, x') \delta(x' - x_s) dx' dt' \right\rangle. \quad (13)$$

Нехай $f(x_s)$ – функція розподілу випадкової величини x_s , яке є випадковою точкою, в якій діє точкове джерело. Тоді співвідношення (13) набуде вигляду

$$\langle c(t, x) \rangle = c^h(t, x) + \omega \int_{x_1}^{x_2} \int_0^t \int_0^{x_0} f(x_s) G(t, t'; x, x') \delta(x' - x_s) dx' dt' dx_s. \quad (14)$$

Тут проміжок $[x_1, x_2]$ – проміжок усереднення, причому $0 \leq x_1 < x_2 \leq x_0$.

Розглянемо деякі можливі варіанти функції розподілу $f(x_s)$.

A. Рівномірний розподіл

Нехай $f(x_s)$ – функція густини рівномірного розподілу на проміжку $[x_1, x_2]$, а саме $f(x_s) = (x_2 - x_1)^{-1}$.

Підставимо вираз для функції Гріна (12) в інтегральний доданок співвідношення (14). Після усереднення одержимо

$$\langle c(t, x) \rangle = c^h(t, x) + \frac{2\omega}{dx_0} \frac{\cos(x_1) - \cos(x_2)}{x_2 - x_1} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{y_n^3} \left(1 - e^{-\frac{dy_n^2 t}{\rho}} \right) \sin(y_n x). \quad (15)$$

Якщо проміжок $[x_1, x_2]$ співпадає з усією областю тіла, тоді формула (15) зведеться до вигляду

$$\langle c(t, x) \rangle = c^h(t, x) + \frac{2\omega}{dx_0^2} [1 - \cos(x_0)] \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{y_n^3} \left(1 - e^{-\frac{dy_n^2 t}{\rho}} \right). \quad (16)$$

B. Трикутний розподіл

Нехай точка дії точкового джерела маси x_s має трикутний розподіл на проміжку $[x_1, x_2]$, функція густини якого має вигляд

$$f(x_s) = \begin{cases} \frac{2}{x_2 - x_1} - \frac{2}{(x_2 - x_1)^2} [x_1 + x_2 - 2x_s], & x_s \in [x_1, x_2] \\ 0, & x_s \notin [x_1, x_2] \end{cases}$$

Тоді за формулою (14) для усередненої концентрації домішкової речовини отримаємо

$$\langle c(t, x) \rangle = c^h(t, x) + \frac{4\omega}{dx_0 (x_2 - x_1)^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{y_n^4} \left(1 - e^{-\frac{dy_n^2 t}{\rho}} \right) \sin(y_n x) \times \left[2 \sin \left(y_n \frac{x_1 + x_2}{2} \right) - \sin(y_n x_1) - \sin(y_n x_2) \right]. \quad (17)$$

Якщо проміжок $[x_1, x_2] = [0, x_0]$, тоді маємо

$$\langle c(t, x) \rangle = c^h(t, x) + \frac{8\omega}{dx_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{y_n^4} \left(1 - e^{-\frac{dy_n^2 t}{\rho}} \right) \sin(y_n x). \quad (18)$$

С. Перший частковий випадок бета-розподілу

Розглянемо частковий випадок бета-розподілу розташування випадкового точкового джерела, який відповідає ситуації найімовірнішого знаходження джерела біля нижньої границі шару. Функція густини розподілу $f(x_s)$ у цьому випадку має вигляд [6]

$$f(x_s) = \begin{cases} \alpha \left(\frac{x_s}{x_0} \right)^{\alpha-1}, & x_s \in [0, x_0], \\ 0, & x_s \notin [0, x_0], \end{cases}$$

де α – ступінь вільності розподілу. Зазначимо, що зі збільшенням параметра α імовірність знаходження точкового джерела біля поверхні $x=0$ спадає, а в околі нижньої границі $x=x_0$ – зростає.

Підставимо вираз для $f(x_s)$ у співвідношення (14). Маємо

$$\langle c(t, x) \rangle = c^h(t, x) + \frac{2\omega\alpha}{dx_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{y_n^2} \left(1 - e^{-\frac{dy_n^2 t}{\rho}} \right) \sin(y_n x) \times \\ + \int_0^{x_0} \left(\frac{x_s}{x_0} \right)^{\alpha-1} \sin(y_n x_s) dx_s. \quad (19)$$

Д. Другий частковий випадок бета-розподілу

Нехай розташування випадкового точкового джерела найбільш імовірно біля верхньої границі шару. В цьому випадку функція густини розподілу $f(x_s) \in [6]$

$$f(x_s) = \begin{cases} \beta \left(1 - \frac{x_s}{x_0} \right)^{\beta-1}, & x_s \in [0, x_0], \\ 0, & x_s \notin [0, x_0] \end{cases}$$

де β – ступінь вільності розподілу. Зауважимо, що зростання значення ступеня вільності β призводить до більш імовірного розташування точкового джерела біля поверхні $x=0$, у той же час імовірність розташування джерела в околі іншої границі шару зменшується.

Якщо підставимо густину розподілу у співвідношення (14), отримаємо

$$\langle c(t, x) \rangle = c^h(t, x) + \frac{2\omega\beta}{dx_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{y_n^2} \left(1 - e^{-\frac{dy_n^2 t}{\rho}} \right) \sin(y_n x) \times \\ + \int_0^{x_0} \left(1 - \frac{x_s}{x_0} \right)^{\beta-1} \sin(y_n x_s) dx_s. \quad (20)$$

Проведемо числові експерименти для всіх чотирьох варіантів імовірнісного розподілу розташування точкового джерела в області тіла.

V. ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ УСЕРЕДНЕНОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДОМІШКОВОЇ РЕЧОВИНИ

Числові розрахунки тут і надалі проведені у безрозмірних змінних $\xi = x/x_0$, $\tau = d/(\rho x_0^2)t$. За базові параметри задачі прийнято: $d=1$, $\rho=1$, $\omega=7$, $\xi_0=1$, $\xi_1 = x_1/x_0 = 0.3$, $\xi_2 = x_2/x_0 = 0.7$, $c_0=1$, $c_* = 0.25$.

Розподіли усередненої концентрації домішкової речовини за різних густин функції розподілу випадкового розташування точкового джерела наведено на рис. 1–4. Криві 1–4 обчислені для різних значень безрозмірного часу $\tau = 0.01, 0.05, 0.2, 1$ відповідно. Ряди у формулах (15) – (20) були підсумовані з точністю 10^{-7} .

Рис. 1 ілюструє розподіли усередненої концентрації частинок домішки в шарі безрозмірної товщини ξ_0 за рівномірного на проміжку $[\xi_1, \xi_2]$ ймовірнісного розподілу координати джерела маси. Розрахунки проводилися за формулами (15), (16). Рис. 2 показує поведінку функції $\langle c(\tau, \xi) \rangle$, обчисленої за формулами (17), (18) у випадку трикутного розподілу місця дії точкового джерела x_s . Тут рис. 1а, 2а наведені для ненульового інтервалу рівномірного і трикутного розподілів $[\xi_1, \xi_2]$ значно меншого ніж товщина шару, рис. 1б, 2б – для випадку співпадіння проміжку $[\xi_1, \xi_2]$ зі всією областю тіла $[0, \xi_0]$.

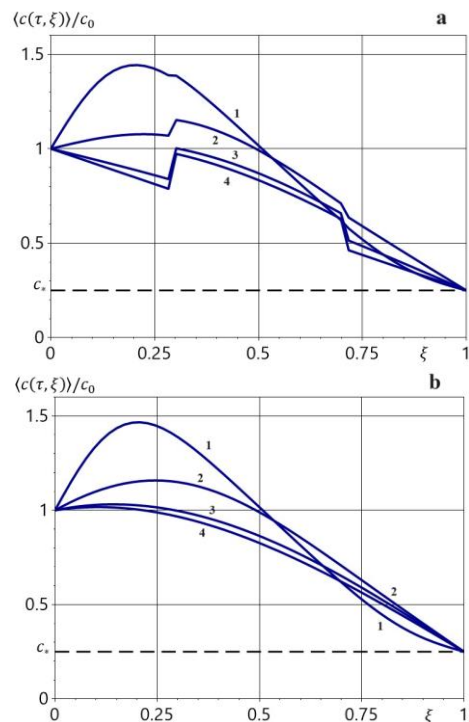


Рисунок 1. Графіки усередненої концентрації домішки за рівномірного розподілу розташування точкового джерела маси

Рис. 3 для найімовірнішого розташування джерела в околі нижньої границі шару проілюстровано для $\alpha = 1.5$ (рис. 3а) і $\alpha = 6$ (рис. 3б). Обчислення функції $\langle c(\tau, \xi) \rangle$ виконані за формулою (19). Рис. 4

показує поведінку функції усередненої концентрації за найбільш ймовірної дії точкового джерела маси в околі верхньої границі для $\beta = 1.5$ (рис. 4a) і $\beta = 6$ (рис. 4b). У цьому випадку розрахунки проводилися за співвідношенням (20).

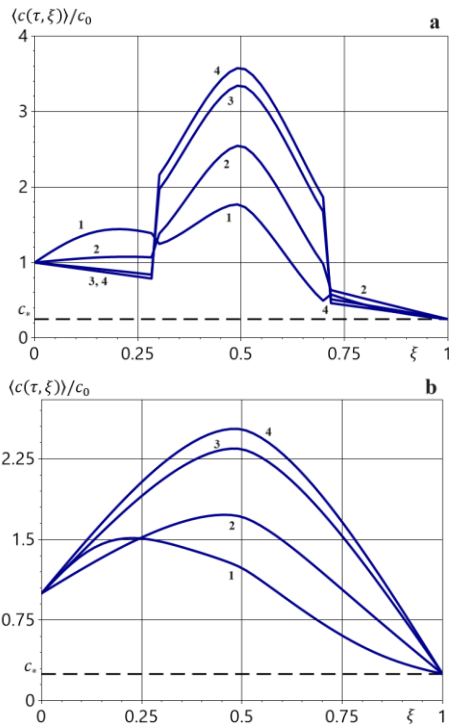


Рисунок 2. Графіки усередненої концентрації домішки за трикутного розташування точкового джерела маси

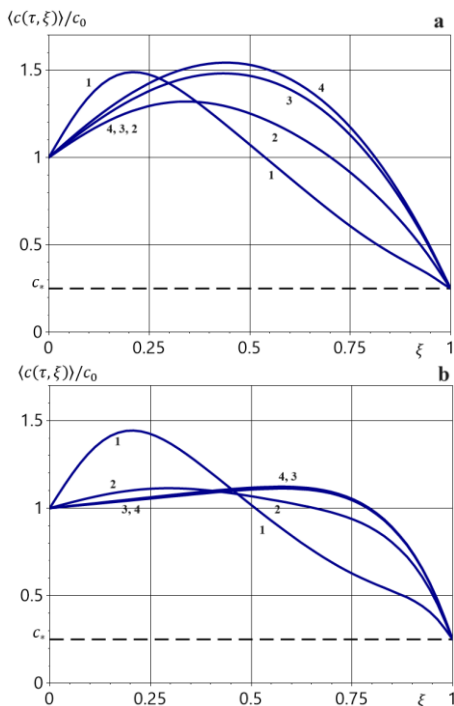


Рисунок 3. Графіки усередненої концентрації домішки за найімовірнішого розташування точкового джерела маси в околі нижньої границі шару

Зазначимо, що наявність точкового джерела маси збільшує значення концентрації мігруючої речовини у всій області тіла. При цьому спостерігається характерне зростання функції усередненої концентрації від поверхні тіла (рис. 1b, 3a, 4a, 4b) або всередині шару (рис. 1a, 2a, 2b, 3b). Для всіх

розглянутих імовірнісних розподілів безрозмірний час виходу на стаціонарний режим є однаковим $\tau = 1.5$. Ймовірнісний розподіл місця розташування джерела і наявність інтервалу $[\xi_1, \xi_2]$ визначення розподілу суттєво впливає на поведінку усередненої концентрації домішки (рис. 1–4). У випадку рівномірного розподілу для малих часів характерне значне зростання концентрації домішки від поверхні $\xi = 0$ (криві 1 на рис. 1a, 1b). Зі збільшенням часу протікання процесу дифузії у верхній частині шару значення концентрації зменшуються (рис. 1). Причому ці зміни відбуваються тим повільніше, чим

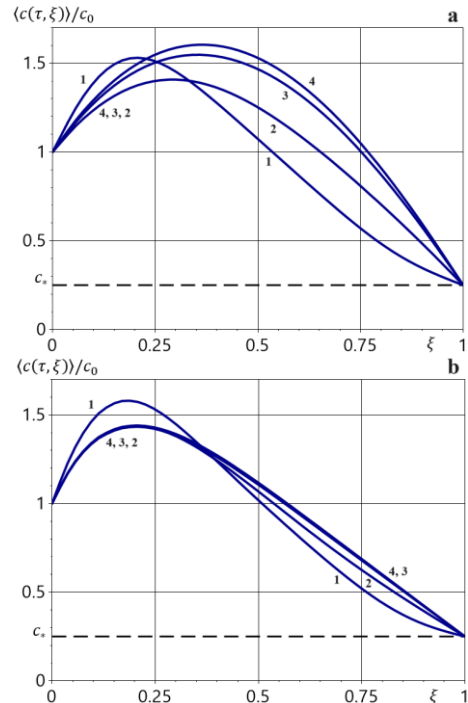


Рисунок 4. Графіки усередненої концентрації домішки за найімовірнішого розташування точкового джерела маси в околі верхньої границі шару

більшим є τ . У випадку, коли інтервал розподілу співпадає з усією областю тіла, функція усередненої концентрації завжди є гладкою (рис. 1b). Якщо ж інтервал розподілу менший товщини шару, тоді спостерігається різке збільшення усередненої концентрації в околі точки $\xi = \xi_1$ і різке зменшення в околі $\xi = \xi_2$. При цьому таке зростання $\langle c(\tau, \xi) \rangle$ є меншим для малих часів і збільшується з ростом τ (рис. 1a).

Для трикутного розподілу розташування точкового джерела маси характерне значно більше зростання усередненої концентрації на проміжку $[\xi_1, \xi_2]$ ніж у випадку рівномірного розподілу (рис. 1a і 2a), і внесок точкового джерела маси значно перевищує внесок від розв'язку однорідної задачі. Також спостерігається наявність максимуму $\langle c(\tau, \xi) \rangle$, величина якого зростає зі збільшенням часу протікання процесу дифузії (рис. 2). При цьому, якщо інтервал розподілу співпадає з усією областю тіла, цей максимум з часом зсувається до середини шару (рис. 2b), в іншому випадку точка максимуму функції усередненої концентрації не змінюється (рис. 2a).

У випадку найбільш імовірного розташування точкового джерела маси в околі однієї з границь

шару для малих ступенів вільностей також характерне приповерхнєве зростання усередненої концентрації для малих часів (криві 1, рис. 3а, 4а), яке спочатку зменшується, а потім збільшується і зсувається вглиб тіла (криві 2–4, рис. 3а, 4а). При великих α зі збільшенням часу дифузійного процесу максимум усередненої концентрації зсувається у другу половину шару (криві 3, 4, рис. 3б), проте його значення зростає несуттєво. У випадку найімовірнішого розташування точкового джерела в околі поверхні $\xi=0$ максимум $\langle c(\tau, \xi) \rangle$ незначно зсувається вглиб шару на інтервалі $[0.2, 0.37]$ (рис. 4б).

VI. АНАЛІЗ ВКЛАДУ ДОДАНКІВ В УСЕРЕДНЕНУ КОНЦЕНТРАЦІЮ ДОМІШКОВОЇ РЕЧОВИНИ

Для визначення вкладу доданків у розв'язки для усередненої концентрації наведено таблиці I і II, в яких для безрозмірного часу $\tau=1$ представлено значення функцій $\langle c(\tau, \xi) \rangle$, $c^h(\tau, \xi)$, згортки функції Гріна з джерелом при $\omega=1$

$$I(\tau, \xi) = \left\langle \int_0^t \int_0^{x_0} G(t, t'; x, x') \delta(x' - x_s) dx' dt' \right\rangle,$$

а також різниці $\Delta(\tau, \xi) = |c^h(\tau, \xi) - I(\tau, \xi)|$.

Дані табл. I для рівномірного розподілу і табл. II для трикутного розподілу на проміжку $[0.3, 0.7]$ розташування точкового джерела маси наведені в моменти часу $\tau=1$.

ТАБЛИЦЯ I

ξ	$\langle c(\tau, \xi) \rangle$	$c^h(\tau, \xi)$	$I(\tau, \xi)$	$\Delta(\tau, \xi)$
0	1	1	0	1
0.1	0.925008	0.925008	0	0.925008
0.2	0.850015	0.850015	0	0.850015
0.3	0.973376	0.77502	0.198356	0.576664
0.4	0.913357	0.700023	0.213334	0.48669
0.5	0.833369	0.625025	0.208345	0.41668
0.6	0.736717	0.550023	0.186694	0.363329
0.7	0.626699	0.47502	0.151679	0.32334
0.8	0.400015	0.400015	0	0.400015
0.9	0.325008	0.325008	0	0.325008
1	0.25	0.25	0	0.25

Зазначимо, що для рівномірного розподілу на проміжку $[\xi_1, \xi_2]$ розташування точкового джерела маси для малих часів протікання процесу дифузії різниця $\Delta(\tau, \xi)$ між розв'язком однорідної задачі та інтегральним доданком $I(\tau, \xi)$ розв'язку неоднорідної задачі є монотонно спадною функцією. Для великих τ функція $\Delta(\tau, \xi)$ спадає від границі $\xi=0$, проте у другій половині шару наявний її локальний максимум (табл. I). Наприклад, $\max_{\xi \in (0.5\xi_0, \xi_0)} \Delta(\tau, \xi) \Big|_{\tau=1} \approx 0.4$. У випадку трикутного розподілу розташування джерела на проміжку $[\xi_1, \xi_2]$ функція $\Delta(\tau, \xi)$ спочатку зростає на проміжку $[0, 0.2]$, потім відбувається різке падіння і подальше зростання цієї функції до досягнення локального максимуму в точці $\xi_{\max} = 0.5$. З ростом τ максимум різниці зсувається вглиб тіла. Так, для $\tau=1$ точка, в якій спостерігається максимум є $\xi_{\max} = 0.5$, причому

$\max_{\xi \in (0, \xi_0)} \Delta(\tau, \xi) \Big|_{\tau=1} = 2.329$ (табл. II). Для рівномірного

розподілу на проміжку $[\xi_1, \xi_2]$ величина інтегрального доданку завжди менша ніж $c^h(\tau, \xi)$, причому в усій області тіла (табл. I). У той же час у випадку трикутного розподілу інтегральний доданок відмінний від нуля тільки в $[\xi_1, \xi_2]$, проте може перевищувати величину $c^h(\tau, \xi)$ (табл. II).

ТАБЛИЦЯ II

ξ	$\langle c(\tau, \xi) \rangle$	$c^h(\tau, \xi)$	$I(\tau, \xi)$	$\Delta(\tau, \xi)$
0	1	1	0	1
0.1	0.925008	0.925008	0	0.925008
0.2	0.850015	0.850015	0	0.850015
0.3	2.147508	0.77502	1.372488	0.597468
0.4	3.071903	0.700023	2.37188	1.671856
0.5	3.579042	0.625025	2.954018	2.328993
0.6	2.921903	0.550023	2.37188	1.821856
0.7	1.847508	0.47502	1.372488	0.897468
0.8	0.400015	0.400015	0	0.400015
0.9	0.325008	0.325008	0	0.325008
1	0.25	0.25	0	0.25

VII. ВИСНОВКИ

Таким чином проведено моделювання процесу дифузії домішкової речовини в шарі за дії випадкового точкового джерела. Розв'язок крайової задачі знайдений у вигляді суми розв'язку однорідної задачі і згортки функції Гріна з джерелом. Усереднення отриманого розв'язку виконане для рівномірного і трикутного розподілів на підінтервалі і в усій області тіла. Розглянуто випадки найімовірнішого розташування випадкового точкового джерела в околі верхньої і нижньої границь шару. Розроблено програмні модулі для симуляції поведінки усередненої концентрації за різних імовірнісних розподілів розташування точкового джерела. Встановлено основні закономірності шуканої функції в залежності від параметрів задачі. Зокрема показано, що наявність точкового джерела маси збільшує значення концентрації мігруючої речовини, при цьому спостерігається характерне зростання функції усередненої концентрації від поверхні тіла або всередині шару. Також проаналізовано вклад доданків в усереднену концентрацію домішкової речовини і визначено, що для рівномірного розподілу на підінтервалі величина інтегрального доданку завжди менша ніж розв'язок однорідної задачі. А у випадку трикутного розподілу інтегральний доданок відмінний від нуля тільки в інтервалі розподілу, проте може перевищувати розв'язок однорідної задачі.

Результати отримані при виконанні держбюджетної науково-технічної теми з фундаментальних досліджень (№ державної реєстрації 0123U101691).

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Г. П. Лопушанська, О. М. Бугрій, А. О. Лопушанський. Диференціальні рівняння та рівняння математичної фізики. Видавець : І. Е. Чижиков. 2012. 362 с.
- [2] J. Crank. The mathematics of diffusion / . Oxford : Clarendon Press, 1975. № 2.
- [3] M. Abramowitz, I. A. Stegun. Handbook of Mathematical Functions. National Bureau of Standards Applied Mathematics. 1964.
- [4] I. N. Sneddon. Fourier transforms. New York : Dover Publications, Inc., 1995.
- [5] G. A. Korn, T. M. Korn. Mathematical handbook for scientists and engineers. Mineola : Dover Publications, Inc., 2000. № 2.
- [6] О. Ю. Чернуха, Ю. І. Білушак, А. С. Чучвара. Моделювання дифузійних процесів у стохастично неоднорідних шаруватих структурах. Львів : Растр-7, 2016.

Моделювання вимушених гармонічних коливань прямокутного фундаменту на водонасиченій шаруватій основі

<https://doi.org/10.31713/МСІТ.2023.042>

Олег Савицький

Leading scientist, Department of Hydrodynamical Acoustics

Institute of Hydromechanics of NASU

Kyiv, Ukraine

savitskii@nas.gov.ua

ORCID 0000-0002-9212-1744

Abstract—A numerical study of the dynamic contact problem is carried out by the method of orthogonal polynomials. A symbolic solution was found for the double transformants of the vertical displacements of the layered two-phase poroelastic liquid saturated base under the action of arbitrary vertical contact pressures. Numerical analysis was performed for the Rayleigh function and the components of displacements in the kernels of integrable functions. An example of calculating double integrals necessary to determine the contact pressures of two-phase soil under the base of the foundation is given.

Keywords—dynamic contact problem; orthogonal polynomials method; Biot's model; symbolic solution; Rayleigh wave, normal waves in the layer.

I. ВСТУП

Динамічні дії на фундаменти споруд викликають реакцію ґрунтової основи, яка складається з жорсткості (пружної) та загасання (за рахунок втрат у ґрунтовому матеріалі та випромінювання пружних хвиль). Нормативні методики оцінки складових реакцій (жорсткості та загасання) і амплітуд переміщень поширених фундаментних конструкцій прямокутної у плані форми не завжди враховують особливості ґрунтової основи. Застосування сучасних геотехнічних програмних засобів для аналізу коливань системи фундамент – основа залишається складною для постановки задач проблемою з досить тривалими розрахунками.

Метою роботи є розробка комп'ютерної програми для моделювання вимушених коливань прямокутного у плані жорсткого штампу на пористопружному насиченому рідиною (ППНР) шарі з защемленою нижньою гранню. Підшва фундаменту непроникна для порової рідини. Для таких умов коливання ускладнюються за рахунок взаємодії фаз ґрунтового середовища, а також прояву резонансних явищ для певних частот коливань в залежності від геометричних характеристик розрахункової схеми.

Для моделювання основи використовується символічний розв'язок задачі про гармонічні коливання з врахуванням всіх хвильових процесів в рамках моделі суцільного середовища.

Застосовуються рівняння моделі Моріса Біо [1] для ППНР ґрунту у формі [2, п. 1.3.2].

II. ДИНАМІЧНА КОНТАКТНА ЗАДАЧА

Динамічна взаємодія малозаглибленого прямокутного фундаменту з ґрунтовою основою при вимушених вертикальних гармонічних коливаннях розглядається як динамічна контактна задача. Контактні умови на підшві фундаменту в сейсмічному діапазоні частот та при обмежених експлуатаційних умовах складаються з рівняння коливань фундаменту під дією силового навантаження чи заданого переміщення та відповідності переміщень фаз під підшвою та підшви фундаменту. Напружений стан ґрунту та переміщення визначається тільки на поверхні підшви.

Застосовується метод ортогональних поліномів [2] для розв'язку динамічних контактних задач. З застосуванням інтегральних перетворень отримано систему інтегральних рівнянь, контактні тиски на межі двофазного середовища представлено інтегродиференціальними співвідношеннями для набору функцій, що розкладаються в ряди по ортогональних поліномах. Для підвищення ефективності враховуються особливості для контактних тисків фаз ґрунту під краями фундаменту. Систему інтегральних рівнянь зведено до нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів рядів по ортогональних поліномах. Її розв'язок методом покращеної редукції призводить до визначення контактних тисків, амплітуд реакції основи та переміщень фундаменту при вимушених гармонічних коливаннях. Окремо в аналітичному вигляді виділено інтегральні реакції фаз на підшві, що дозволяє порівняти внесок фаз.

Такий метод споріднений з методом граничних елементів, який широко використовується при дослідженнях контактних задач. Маємо один граничний елемент – площу підшви, представлення невідомих функцій та їх розподіл виконується методом ортогональних поліномів. Всі моди коливань фундаменту можна розглядати при умові підбору систем ортогональних поліномів [2].

III. СИМВОЛЬНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ДЛЯ ТРАНСФОРМАНТ ПЕРЕМІЩЕНЬ ФАЗ

Розглянуто задачу про переміщення фаз ППНР шару висотою Ha з затисненою нижньою гранню під дією на прямокутній площадці (розмірами $2a$, $2b$) верхньої грані шару (позначеної сірим кольором на (рис. 1) під дією на тверду пружну пористу та рідинну порову фази тисків (безрозмірних відносно модуля зсуву в основі) q_1 (причина ефективних напружень в твердій фазі) та q_2 (тиск в рідині) з симетрією, що відповідає контакту підосви фундаменту при його вертикальних коливаннях без тертя. На Рис. 1 показано чверть шаруватої основи, для ґрунтового середовища x , y необмежені, $0 < z < Ha$. В Декартовій системі координат $Oxuz$ використано рівняння [2, (7.3)–(7.4)] з формулами для тисків та переміщень для запису граничних умов [2, (7.6)–(7.11)]. Система (порядку 8 з числом змінних біля 20) та проміжні символні розв'язки занадто громіздкі, формули наведено у звіті ІГМ НАНУ по бюджетній темі (2022 р.). Приклад для відповідної пласкої задачі наведено в [2, п. 7.3.1].

IV. ФУНКЦІЯ РЕЛЕЯ ТА ФУНКЦІЇ КОМПОНЕНТ ПЕРЕМІЩЕНЬ

Детермінант системи рівнянь з граничних умов на гранях ППНР шару для визначення коефіцієнтів в виразах для чотирьох потенціалів (вісім коефіцієнтів при експонентах з позитивними та негативними аргументами, що залежать від товщини шару, трьох об'ємних хвиль в ППНР середовищі та частоти коливань) визначається в символній формі (при застосуванні системи комп'ютерної алгебри Maple) після переходу до радіальної системи координат [2, С. 357, 358].

На рис. 2 показано значення комплексної функції $F_R(\zeta)$ в залежності від дійсної змінної інтегрування x

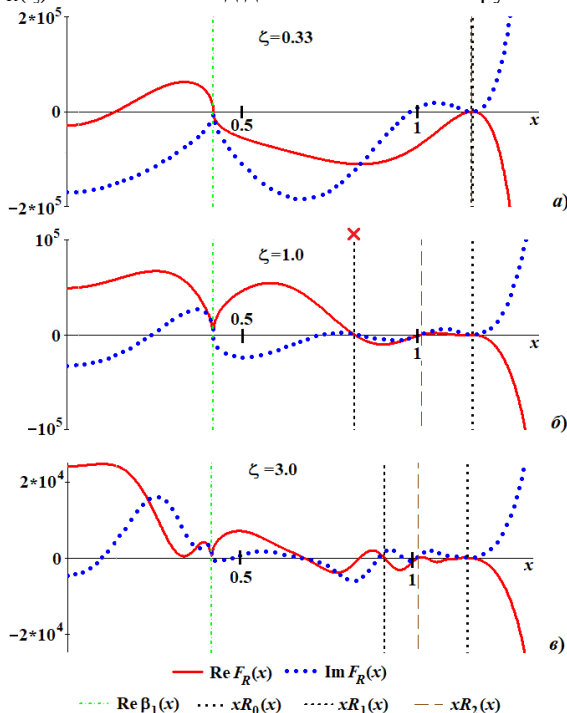


Рисунок 2. Функція Релея для а) $\zeta=0.33$; б) $\zeta=1.0$; в) $\zeta=3.0$

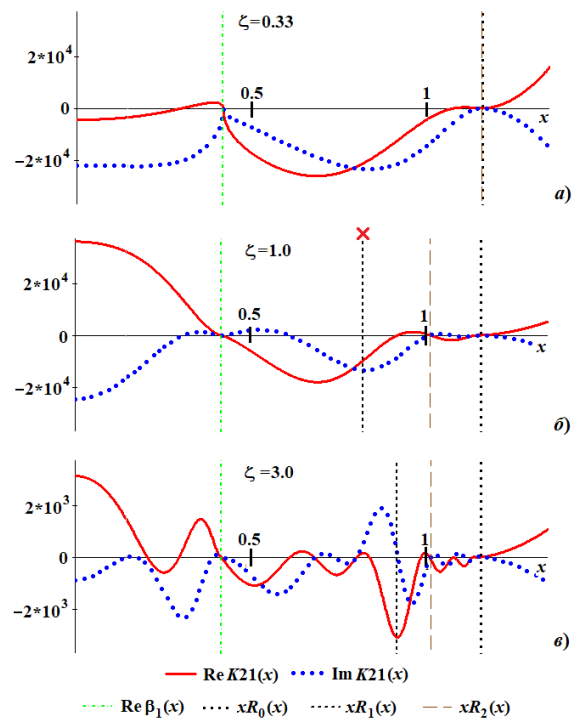


Рисунок 3. Функція K21 для а) $\zeta=0.33$; б) $\zeta=1.0$; в) $\zeta=3.0$

в діапазоні від 0 до значення, що відповідає швидкості поверхневої хвилі $xR_0(x) > 1$. Для більших значень x функція експоненційно зростає. Діапазон містить точку $\text{Re}\beta_1(\zeta)$ швидкості першої поздовжньої хвилі відносно c_2 – референтної частоти поперечної хвилі в ППНР середовищі [1, (5.4)]. Тут $\zeta = a \omega / c_2$ – безрозмірна частота, ω – кругова частота коливань.

Тут для прикладів на рис. 3, рис. 4 вибрано три значення ζ : а) $\zeta=0.33$; б) $\zeta=1.0$; в) $\zeta=3.0$, а також розрахункові геометричні параметри: $a=5$ м, $H=2.8$, $b/a=1$. Для моделі Біо взято параметри з [2, п. 7.2.2,

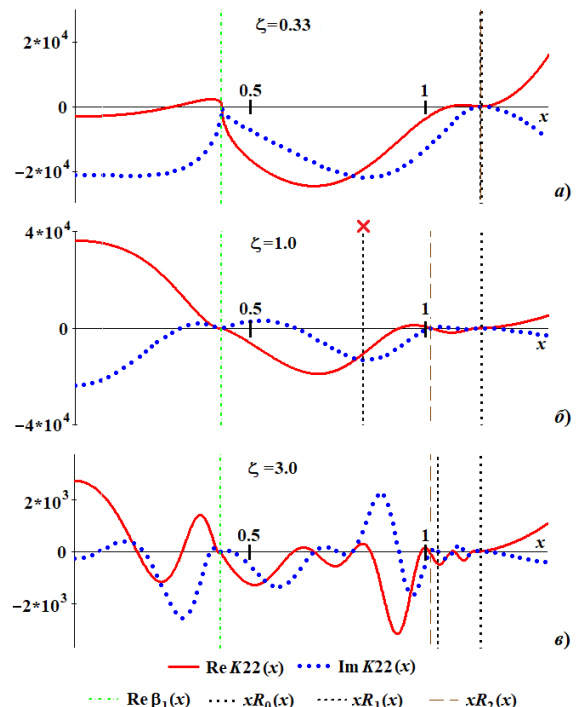


Рисунок 4. Функція K22 для а) $\zeta=0.33$; б) $\zeta=1.0$; в) $\zeta=3.0$

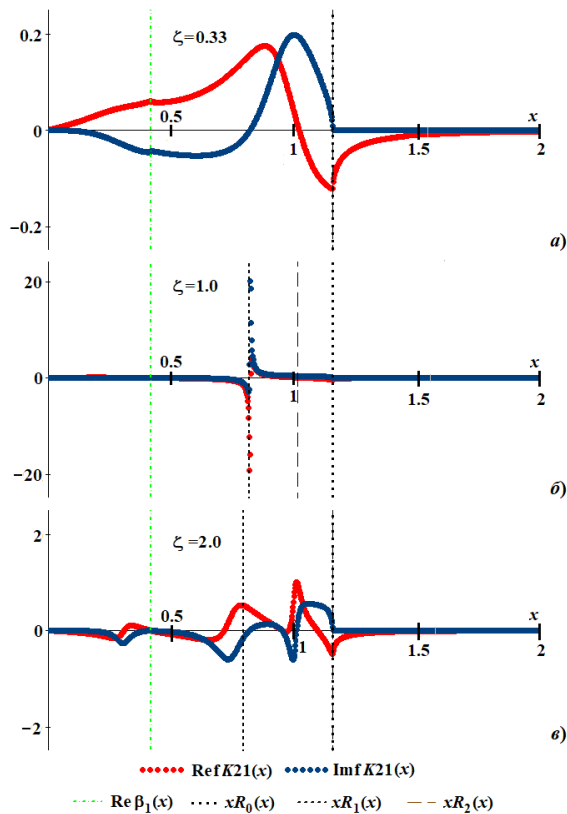


Рисунок 5. Ядро інтегралу K21 для а) $\zeta=0.33$; б) $\zeta=1.0$; в) $\zeta=2.0$

С. 364]. Розглядаємо традиційний для динаміки фундаментів діапазон $\zeta < 6$, що для призначених параметрів відповідає частотам не вище 50 Гц. Для

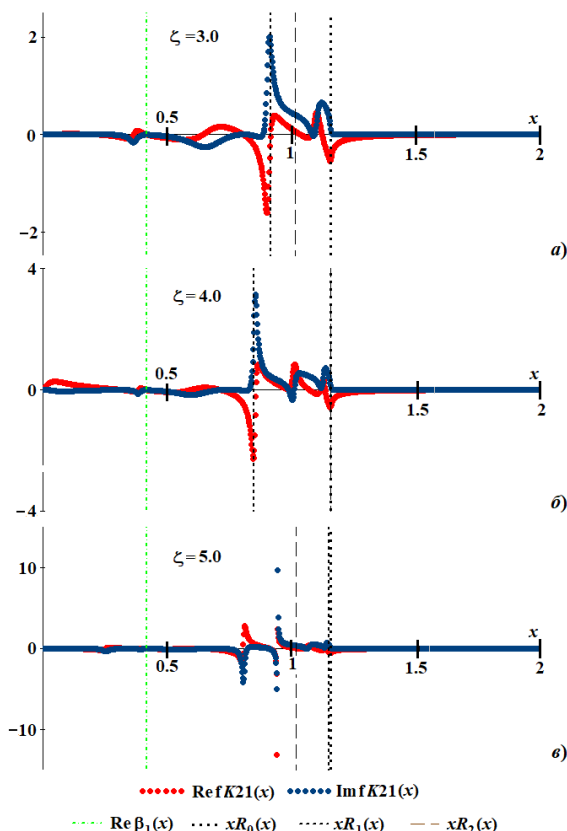


Рисунок 6. Ядро інтегралу K21 для а) $\zeta=3.0$; б) $\zeta=4.0$; в) $\zeta=5.0$

невисоких ζ маємо для $F_R(\zeta)$ тільки корінь Релея. При наближенні ζ до 1.0 при x з'являється особливий корінь $\text{Re}\beta_1 < x < 1$, що у поєднанні з ненульовим значенням чисельника призводить до різкої зміни знака функції ядра. Зі зростом частоти з'являються додаткові дійсні корені $xR_1(x)$, $xR_2(x)$, ... функції $F_R(\zeta)$. При збільшенні ζ кількість коренів зростає, при цьому виникають коливання функцій, що розглядаються та ядер при наближенні до $\text{Re}\beta_1$ та до xR_0 . Це стосується Fig. 2–Fig. 6 на прикладі дискримінанту та символічних виразів трансформант переміщень твердої та рідинної фаз від тиску на тверду фазу.

На Рис. 3, Рис. 4 представлено зміну по x множників чисельників ядер, що відповідають переміщенням твердої фази (K21) та рідинної фази (K22) від тиску підшви на тверду фазу основи.

На Рис. 5, Рис. 6 показано приклади функції ядра з множником K21 для частот а) $\zeta=0.33$; б) $\zeta=1.0$; в) $\zeta=3.0$ (Fig. 5) та а) $\zeta=3.0$; б) $\zeta=4.0$; в) $\zeta=5.0$ (Рис. 6). Інтегрування функцій при $\zeta=1.0$ вимагає застосування спеціальних прийомів та попереднього визначення коренів функції Релея.

V. КОЕФІЦІЄНТИ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ РЯДІВ ПО ОРТОГОНАЛЬНИМ ПОЛІНОМАМ

Fig. 7 ілюструє зміну з частотою інтегралу одного з коефіцієнтів системи алгебраїчних рівнянь (що відповідає коефіцієнту з [2, (7.41)] при $p=0$, $q=0$) для товщини шару в основі $H=1.5$ та $H=5.0$. На графіках показано згущення резонансних явищ біля невисоких частот при збільшенні товщини шару. Підінтегральні функції містять з представлень поліномів Чебишова також інтеграли від функцій Бесселя 1-го роду та тригонометричних функцій (див. приклад [2, С. 356–359] для ППНР півпростору).

Теоретично в пружному шарі при навантаженні виникають нормальні хвилі на частотах, які носять назву власних частот шару. Слід також зауважити, що в умовах подібного навантаження в пружному шарі в певних інтервалах частот виникають обернені хвилі, які задовольняють умовам випромінювання. Для ППНР середовища ці закономірності мають зберігатись.

Частоти виникнення нормальних хвиль за номером n в пружному шарі в залежності від швидкості поздовжньої хвилі та товщини шару визначається формулою $\zeta_n = \pi(n+0.5)/(H\beta_1)$, ($n=0, 1, 2, \dots$). З врахуванням пружних властивостей ППНР середовища наведемо значення перших трьох власних частот: $\zeta_0=2.505\zeta$; $\zeta_1=7.516\zeta$; $\zeta_2=12.526\zeta$ для $H=1.5$ та $\zeta_0=0.752\zeta$; $\zeta_1=2.255\zeta$; $\zeta_2=3.758\zeta$ для $H=5.0$. На вказаних частотах коливання шару відбувається “без навантаження”, що на графіках імпедансу (комплексної реакції на підшви при переміщенні одиничної амплітуди) підтверджується практично нульовим значенням імпедансу для власних частот. На даному етапі розробки розрахункової програми такий ефект для імпедансу проявляється. Але необхідне подальше вдосконалення алгоритму для уточнення оцінки подвійних інтегралів в коефіцієнтах алгебраїчної системи для визначення

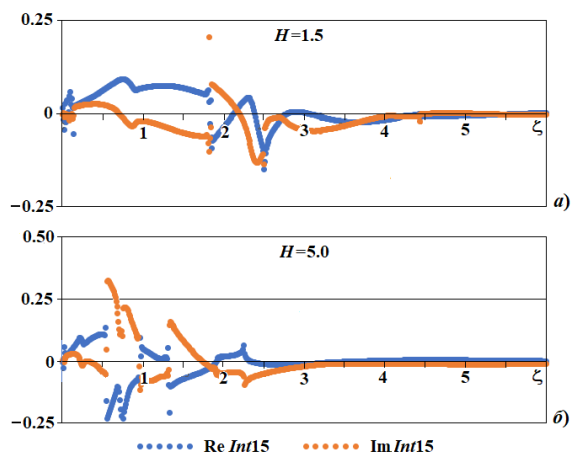


Рисунок 7. Залежність від безрозмірної частоти інтегралу з формули [2, (7.41)] ($Int15$) для шаруватої ППНР основи при $H=1.5$ та $H=5.0$

коефіцієнтів у рядах по ортогональних поліномах з інтегродиференціальних співвідношеннях [2, (7.26)–(7.33)]. Поки що результати розв’язку нестабільні.

Для оцінки інтегралів використовуються адаптивні процедури (Ньютона-Котеса та інші), застосовано зведення внутрішніх інтегралів після переходу у полярну систему координат до сумування рядів на основі квадратурної формули с ваговою функцією Якобі [2, С. 360–362]. Для контролю проміжних результатів використовуються одночасно кілька засобів комп’ютерного програмування різного типу.

VI. ВИСНОВКИ

Для числового дослідження динамічної контактної задачі методом ортогональних поліномів знайдено символічний розв’язок для подвійних трансформант вертикальних переміщень фаз шаруватої двофазної ППНР основи (за моделлю Біо) під дією довільних вертикальних контактних тисків на підшві фундаменту-штампу при умовах постійного контакту без тертя та непроникної для порової рідини підшві. Виконано чисельний аналіз для функції Релея та функцій компонент переміщень в ядрах підінтегральних функцій що залежать від двох десятків параметрів, а також для одного з коефіцієнтів системи алгебраїчних рівнянь для визначення коефіцієнтів рядів по ортогональних поліномах при знаходженні контактних тисків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. A. Biot, Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Lower-frequency range. *J. Acoust. Soc. Amer.* 1956. Vol. 28(2). Pp. 168–178.
- [2] A. Gomilko, O. Savvitskiy, and A. Trofimchuk. Superposition, eigenfunctions and orthogonal polynomials methods in elasticity and acoustic boundary value problems. Kyiv : Naukova dumka, 2016. [Гомилко А. М., Савицкий О. А., Трофимчук А. Н. Методы суперпозиции, собственных функций и ортогональных многочленов в граничных задачах теории упругости и акустики. Киев : Наук. думка, 2016. 436 с.] itgip.org/category/ua_publishing-activities/ua_monographs_manuals_and_tutorials

Про систему керування анаеробним біореактором для ефективної очистки стічних вод

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.043>

Андрій Сафоник

Навчально-науковий інститут енергетики,
автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Олена Полухович

Інформаційно-обчислювальний центр
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
o.o.polyukhovych@nuwm.edu.ua

Анотація—Враховуючи те, що збереження енергії та економія енергоємних ресурсів стають все більш актуальними завданнями сьогодення, зокрема в керуванні очисткою стічних вод, розглянуто використання анаеробних біореакторів для очищення стічних вод і отримання біогазу. Запропоновано низку цільових макростанів, які дозволяють оптимізувати процес очищення та використання біогазу. Ці цільові макростани включають зниження концентрації органічних забруднень у воді, збільшення виробництва біогазу та контроль концентрації органічних кислот у реакційному середовищі.

Ключові слова—Анаеробний біореактор; системи очищення стічних вод; біогазовиробництво; цільові макростани; ефективність очищення; енергоефективність системи.

I. ВСТУП

Вода є одним з найбільш важливих ресурсів нашої планети і забезпечення її якісною та ефективною очисткою стає все актуальнішим завданням в умовах всебічного зростання забруднення та обмежених ресурсів. Одним із ключових аспектів ефективної очистки стічних вод є використання біореакторів на основі анаеробних процесів, які дозволяють не лише зменшувати забруднення води, але й виробляти цінний біогаз як побічний продукт.

В даній роботі розглядалися основні аспекти керування та оптимізації анаеробних біореакторів для очищення стічних вод і отримання біогазу. Запропоновано цільові макростани, які дозволяють підтримувати оптимальний рівень очищення та виробництва біогазу, забезпечуючи при цьому стабільність та енергоефективність процесу.

Також було запропоновано можливість зменшення розмірів анаеробного біореактора для локального очищення стічних вод і оптимізовано час перебування стоку в біореакторі. Впровадження запропонованих цільових макростанів та систем керування дозволило збільшити ефективність очисної системи та збереженню ресурсів у процесі очищення стічних вод.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для досягнення результатів у процесі роботи системи біологічної очистки витрачаються різні ресурси, такі як стічна вода, що піддається процедурі очищення, капітальні витрати, необхідні для будівництва очисних споруд, а також експлуатаційні та тимчасові витрати на проведення очищення.

На основі даних наведених в [1; 2] були обрані найбільш вживані показники ефективності, а саме:

1. Ступінь очищення стічної води (Removal Efficiency): Виражає, наскільки успішно стічні води очищаються від забруднень. Це відношення концентрації забруднень до і після очищення.
2. Гідравлічний час перебування стоку на очищенні (Hydraulic Retention Time, HRT): Визначає, скільки часу стічні води перебувають у біореакторі, що впливає на розмір споруди.
3. Навантаження органічної речовини (Organic Load Rate, OLR): Вимірює кількість оброблених забруднень в одиницю часу, виражену в одиницях ХПК.
4. Енергоспоживання системи: враховує витрати енергії на роботу системи, зокрема на обігрів біореактора.
5. Продуктивність біогазу: вимірює кількість біогазу та метану, що виробляється в процесі очищення.
6. Критерій інтенсивності утворення біогазу: визначає ступінь перетворення органічних забруднень у біореакторі.
7. Енергоефективність системи: розглядає витрати і вироблену енергію, зокрема енергію, отриману з біогазу.
8. Якість очищення стічних вод: визначається концентрацією забруднень в очищеній воді відносно початкової.

9. Інтенсивність процесів очищення: вимірюється продуктивністю системи на одиницю робочого об'єму апарату.

Ці показники допомагають в оцінці ефективності систем очищення стічних вод і виборі оптимальних стратегій керування ними.

Виходячи з обраних показників ефективності було запропоновано формалізацію цільових макростанів біологічного очищення у системі стічних вод під час експлуатації стаціонарних біологічних очисних споруд. Ця методологія дозволяє сформулювати цільові макростани, які є експертно заданими функціями від змінних стану системи.

Для забезпечення стабільності та досягнення цих цільових макростанів у системі керування біологічної очистки розроблені алгоритми, які забезпечують інваріантність їх до фазового потоку, тобто забезпечують відповідність цих макростанів в умовах зміни динамічних параметрів системи.

III. ВИРШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Аналогічно до [2] було сформовано двовимірні макрозмінні $c \in \square^n$ для випадку $u \in \square^n$ (наприклад, за змінними T (температура) та C_{in} (витрата стічної води в біореакторі)).

1. Основною метою функціонування біореактора в системі очищення стічних вод є зниження концентрації органічного забруднення стічної води до (або нижче) заданого нормативного значення C_{norm} . При цьому бажано максимально повно перетворити забруднення на біогаз. Якщо G^* – розрахункова кількість біогазу, яку можна отримати із заданої сировини, для системи анаеробного біологічного очищення, то метою керування даним процесом буде:

$$\begin{aligned} c_1^*(t) &= C(u(t)) \rightarrow 1; \\ c_2^*(t) &= G_{out}(t) - G^* \rightarrow 0, t \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (1)$$

2. Збільшення кількості газу не завжди призводить до підвищення енергоефективності $E(t)$ системи через збільшення витрат на обігрів біореактора [3–5]. Формалізація цільового макростану для системи очищення стічних вод через запропоновані критерії якості та енергоефективності системи біологічної очистки, набуде вигляду:

$$\begin{aligned} c_1^*(t) &= C(u(t)) \rightarrow 1; \\ c_2^*(t) &= E(t) \rightarrow \max, t \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (2)$$

3. Одним з основних факторів, які негативно впливають на життєдіяльності анаеробної біомаси є вміст у реакційному середовищі високих концентрацій органічних кислот P , що є проміжним продуктом процесу. Для

анаеробної біомаси можна визначити граничне значення концентрації органічних кислот P^* в робочій зоні біореактора, при якому починається сповільнення процесу очищення. Тому відповідна мета керування:

$$\begin{aligned} c_1^*(t) &= C(u(t)) \rightarrow 1; \\ c_2^*(t) &= P(t) - P^* \rightarrow 0, t \rightarrow \infty, (P(t) \leq P^*). \end{aligned} \quad (3)$$

4. Локальні очисні споруди встановлюються безпосередньо на території підприємства, тому важливим є скорочення розмірів анаеробного біореактора. Відповідно, зменшення часу HRT , що визначає розмір біореактора, при забезпеченні заданої якості очищення при мінливих вхідних параметрах системи може розглядатися як мета керування:

$$\begin{aligned} c_1^*(t) &= C(u(t)) \rightarrow 1; \\ c_2^*(t) &= HRT - HRT^* \rightarrow 0, t \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (4)$$

Сформульовані цільові макростани (1)–(4) задають бажані закони функціонування системи анаеробної біологічної очистки стічних вод, покладено основою синтезу систему керування станами біореактора.

IV. ВИСНОВКИ

Розроблена система керування анаеробним біореактором на основі цільових макростанів забезпечує стабілізації концентрації органічних забруднень на виході з біореактора на заданому рівні при впливі факторів, які можуть дестабілізувати процес очищення. Паралельно показано збільшення виходу біогазу з біореактора при збереженні допустимої якості очищення. В перспективі для досягнення наведених цілей, необхідно розробити та впровадити ефективні алгоритми керування, які враховуватимуть динаміку процесів, що протікають в біореакторі, а також оптимізацію балансу між очищенням стічних вод та отриманням біогазу.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] C. A. de Lemos Chemicharo. Anaerobic reactors. *Biologic Wastewater Treatment Series*. London: IWA Publishing, 2007. Vol. 4.
- [2] J. Mata-Álvarez, J. Dosta, M.S. Romero-Güiza, X. Fonoll, M. Peces, and S. Astals. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 36. Pp. 412–427.
- [3] Гаращенко В. І., Сафоник А. П., Гаращенко О. В. Математичне моделювання процесів магнітного фільтрування і регенерації та оцінка їх ефективності. *Вісник ТДТУ імені І. Пулюя*. 2012. Вип. 2(66). С. 242–248.
- [4] Гаращенко В. І., Гаращенко О. В., Лебедь О. О., Сафоник А. П., Кочергіна О. Д. Теоретичні основи процесу осадження магнітних домішок в намагнічених феромагнітних загрузках. *Вісник НУВГП* : зб. наук. пр. Рівне : НУВГП, 2014. Вип. 1(65). С. 390–397.
- [5] Сафоник А. П., Грицюк І. М., Таргоній І. М. Динамічна оптимізація системи автоматичного керування технологічним процесом очищення води. *Біоніка інтелекту* : наук.-техн. журнал. 2021. Вип. 2(97). С. 50–61.

Розроблення моделі процесу анаеробного очищення стічних вод

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.044>

Андрій Сафоник

Навчально-науковий інститут енергетики,
автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Сергій Полухович

Навчально-науковий інститут енергетики,
автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
s.o.polyukhovych@nuwm.edu.ua

Анотація—Розроблено математичну модель системи анаеробного біологічного очищення стічних вод у біореакторах, включаючи різні аспекти процесу очищення. Побудовано алгоритм розв'язання відповідної модельної задачі. На основі отриманого розв'язку, проведено класифікацію станів системи біологічного очищення стічних вод та сформульовано рекомендації для керування та оптимізації процесу очищення.

Ключові слова—модель анаеробної очистки; біомаса; біореактор; алгоритм розв'язання задачі біологічної очистки; рдере.

I. ВСТУП

Процеси очищення стічних вод є важливою складовою сучасних систем забезпечення якості очисних споруд та збереження водних ресурсів. Серед численних методів очищення, анаеробна біологічна очистка стала однією з найефективніших інженерних стратегій для видалення забруднень зі стічних вод.

Оптимізація процесів, що відбуваються в анаеробних біореакторах, має велике значення для підвищення їх продуктивності та забезпечення стабільності функціонування. Для досягнення цих цілей важливим є розробка математичних моделей та алгоритмів, які дозволяють аналізувати та керувати процесами очищення стічних вод у біореакторах.

Метою роботи була розробка моделі анаеробної очистки стічних вод, розширення розуміння та можливостей керування процесом очищення стічних вод у біореакторах, для підвищення ефективності та стабільності відповідних очисних систем.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Відповідно до теоретико-множинного підходу [1; 2] систему біологічного очищення (СБО) можна розглядати як вхідно-вихідний перетворювач, де вхідний потік стічної води піддається впливу допустимого керування та зовнішніх впливів і в результаті формуються вихідні потоки очищеної води $X_{out}^{(OB)}$ та біогазу $X_{out}^{(G)}$, як показано на рис. 1.



Рисунок 1. Опис процедури очищення стічних вод в біореакторі

Взаємодія і взаємовплив різних аспектів системи, включаючи технічні, біохімічні та фізичні процеси, може бути зручно представлена на основі аналізу взаємозв'язків внутрішніх змінних системи. Це вимагає декомпозиції процесу очищення для виділення основних факторів взаємодії між локальними підпроцесами.

Сталий стан системи анаеробного біологічного очищення включає як вимірювані параметри, так і ті, що складно або неможливо виміряти під час постійного моніторингу.

Серед таких невимірюваних характеристик можна вказати Q_{in} – концентрація речовини в очищуваній воді на вході системи анаеробного очищення, B_{in} – стан біомаси на вході системи θ_{in} – показник теплових потоків на вході системи C_{in} – концентрація біологічно неокисненої речовини, $X_{out}^{(OB)}$ – вихідні характеристики стічної води, $X_{out}^{(G)}$ – вихідні характеристики біогазу.

Комплексна зміна біомаси, концентрації забруднення та біологічно неокисненої речовини з урахування теплових потоків описується системою диференціальних рівнянь (1) за умов (2) (див. наприклад [3]). Для врахування різноманітних взаємовпливів характеристик середовища та процесу доцільно використовувати запізнення за часом у відповідних рівняннях. Це дозволяє розщепити початкову "сильно нелінійну" задачу на більш прості нелінійні задачі. Запізнення завжди присутне у реальних системах, викликане різними причинами, наприклад, перенесення забрудненої речовини вимагає часу. У цій модельній задачі з урахуванням запізнення, будь-яка зміна зовнішніх факторів, така як збільшення концентрації забруднення чи біомаси, відбувається лише після закінчення певного часу (часу запізнення $\tau > 0$).

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{1}{q} \Phi(Q(x, t - \tau)) B - \frac{v\sigma}{\rho} \frac{\partial C}{\partial x}, \\ \frac{\partial B}{\partial t} = \Phi(Q(x, t - \tau)) B - \lambda B - \frac{v}{\sigma_e} \frac{\partial B}{\partial x}, \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} = -v \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \Psi(Q(x, t - \tau)), \\ \sigma \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{\rho q_s} \Phi(Q(x, t - \tau)) B - v \frac{\partial C}{\partial x} - \beta C + D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q|_{x=0} &= Q^*(t), B|_{x=0} = B^*(t), \Theta|_{x=0} = \Theta^*(t), C|_{x=0} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial x}|_{x=L} &= 0, \frac{\partial B}{\partial x}|_{x=L} = 0, \frac{\partial \Theta}{\partial x}|_{x=L} = 0, \frac{\partial C}{\partial x}|_{x=L} = 0, \quad (2) \\ Q|_{t=\tilde{t}} &= 0, -\tau \leq \tilde{t} \leq 0, B|_{t=0} = 0, \Theta|_{t=0} = 0, C|_{t=0} = 0, \end{aligned}$$

де L – довжина біореактора, $\Phi(Q) = \frac{\mu_{\max} Q}{Q + K_s}$, μ_{\max} , K_s , λ , q , q_s , β – коефіцієнти детермінації біомаси, v – швидкість руху речовини, σ_e – ефективна пористість, Ψ – кількість теплоти, Також в рівнянні присутній коефіцієнт дифузії – D_c і $D_c = b_c \varepsilon$, $0 < b_c \leq 1$, ε – малий параметр.

III. ВИРШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Алгоритм розв'язання задачі (1) – (2) наступний:

1. Формулюється задача, включаючи рівняння, початкові умови та граничні умови.
2. Задаємо кількість систем рівнянь n , на основі асимптотичного методу.
3. Застосовуючи асимптотичний метод отримуємо систему PDE.
4. Вибираємо часовий інтервал.
5. Знаходимо розв'язок системи PDE з пункту 3 за допомогою `pdepe` в `Matlab`.
6. У разі виникнення помилки в процесі розрахунку, намагатимемося скоротити часовий інтервал з пункту 4 для отримання задовільного розв'язку на більш короткому часовому інтервалі.
7. Отримуємо значення шуканої функції на всіх часових інтервалах, абсолютні та відносні

похибки на точному розв'язку (якщо він відомий), графіки та анімації числового розв'язку (з точним розв'язком, якщо він відомий).

ВИСНОВКИ

Було надано детальний опис методології для моделювання та аналізу системи анаеробного біологічного очищення стічних вод у біореакторах.

Визначено послідовність дій для розв'язання задач, пов'язаних з аналізом та оптимізацією процесу анаеробного очищення стічних вод.

Розроблена узагальнена модель дозволила створити універсальний підхід до опису процесів у різних біореакторах, що дозволить виділити загальні закономірності процесу та розробити конкретні рекомендації для їх застосування у відношенні до конкретної конструкції біореакторів.

Цей підхід дозволяє систематично досліджувати та аналізувати процес анаеробного очищення стічних вод, розглядаючи різні аспекти системи враховуючи біохімічні та фізичні взаємозв'язки. Результати такого моделювання можуть використовуватися для оптимізації роботи очисних систем і покращення керування процесом очищення стічних вод, що є важливим завданням для збереження довкілля та водних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] A. Balla, M. M. Adamou, "Etude des effets d'une surcharge organique sur le fonctionnement d'un réacteur anaérobie à biomasses fixées. *Sud sciences & technologies*. 2009. Vol. 14. Pp. 13–19.
- [2] D. Batstone, J. Keller, I. Angelidaki, S. Kalyuzhnyi, S. Pavlostathis et al. The IWA anaerobic digestion model No 1 (ADM1). *Wat. Sci. Technol.* 2002. Vol. 45(10). Pp. 65–73.
- [3] Сафоник А. П., Присяжнюк О. В., Ільків І. В. Моделювання процесу очищення стічних вод з урахуванням зміни температури. *Вісник Національного університету водного господарства і природокористування. Сер. Технічні науки* : зб. наук. пр. Рівне : НУВГП, 2022. Вип. 2(98). С. 275–285.
- [4] Сафоник А. П., Ільків І. В. Оптимізація системи автоматизованого керування процесом очищення води. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Івано-Франківськ, 5–10 лип. 2021 р.). Івано-Франківськ, 2021. С. 164–165.
- [5] Сафоник А. П., Грицюк І. М., Таргоній І. М. Динамічна оптимізація системи автоматичного керування технологічним процесом очищення води. *Біоніка інтелекту* : наук.-техн. журнал. 2021. Вип. 2(97). С. 50–61.

До числового моделювання обтікання транспортних апаратів турбулентним ПОТОКОМ

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.045>

Анатолій Сохацький

Кафедра транспортних технологій та міжнародної логістики
Університет митної справи та фінансів
м. Дніпро, Україна
Sokhatsky_anatoly@ukr.net

Анотація—Створення перспективних транспортних апаратів, що рухаються на нових фізичних принципах, є важливою задачею проектувальників. Турбулентний стан атмосфери та нестабільність кінематичних параметрів повітряного середовища ускладнюють проблему. І на сьогодні математичне моделювання турбулентних течій залишається однією з найбільш складних проблем механіки рідини та газу. Надійне передбачення характеристик турбулентних потоків, відноситься до винятково важливої наукової проблеми. Необхідна подальший пошук шляхів та розробка нових методів. Розроблено методику, алгоритми, алгоритми, та комплекс програм для розв'язування задачі аеродинаміки транспортних апаратів. Використано осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса з застосуванням моделі турбулентності Спаларта-Аллмараса в реалізації DES. Виконано числове розв'язування ряду задач. Проведені розрахунки та їх порівняння з результатами експериментальних досліджень підтвердили працездатність методики та розробленого комплексу програм.

Ключові слова—аеродинаміка транспортних апаратів; числове моделювання; рівняння Нав'є-Стокса; моделі турбулентності; аеродинамічні характеристики.

I. ВСТУП

Створення транспортних апаратів на нових фізичних принципах та удосконалення розроблених є важливою задачею проектувальників. На сьогодні існує проблема створення надводних транспортних апаратів. Вплив близько розміщеної межі розділу середовища на аеродинаміку та динаміку руху є недостатньо вивченим питанням. Наявність турбулентного середовища та нестабільність кінематичних параметрів повітряного середовища ускладнюють проблему забезпечення заданого руху транспортного апарата. Окрім цього математичне моделювання турбулентних течій залишається однією з найбільш складних проблем механіки рідини та газу. Надійне передбачення характеристик турбулентних потоків, відноситься до винятково важливої наукової проблеми. Це пов'язано зі складністю та недостатнім вивченням турбулентності як фізичного явища. В роботі розглядаються проблеми побудова математичної

моделі, числового методу, алгоритму розв'язування задачі та розробки програмного забезпечення для дослідження аеродинамічних характеристик транспортних засобів, що рухаються поблизу розділу середовищ. Оцінюються можливості використання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса з застосуванням емпіричних моделей турбулентності. Розроблено методику, алгоритми, та комплекс програм для розв'язування задачі аеродинаміки транспортних апаратів, що рухаються поблизу розділу середовищ. Приводяться приклади числового розв'язування з використання персональних електронно-обчислювальних машин. Попередні дослідження показують, що наявність близько розміщеного розділу середовищ має значний вплив на характеристики течії навколо транспортного засобу. Необхідні розробки математичних моделей для подальших досліджень.

II. СТАН МОДЕЛЮВАННЯ ВЯ'ЯЗКИХ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ

Однією з найскладніших проблем створення швидкісних наземних та надводних транспортних апаратів є задача пошуку раціонального аеродинамічного компонування. Рух такого транспортного засобу з великою швидкістю відбувається поблизу межі розділу середовищ в атмосферних умовах, близьких до параметрів стандартної атмосфери на рівні моря. Близькість водної поверхні сприяє формуванню екранного ефекту – це явище завдяки якого відбувається збільшення підйімальної сили, зменшення індуктивної складової лобового опору, зміна моментних аеродинамічних залежностей. Завдяки екранному ефекту можна досягти високого значення аеродинамічної якості крилевих надводних та наземних транспортних апаратів.

Аеродинамічні процеси мають визначаючий вплив на технічні характеристики транспортних апаратів. Для забезпечення заданого режиму руху транспортного апарата необхідно, щоб його аеродинамічні, геометричні, масові, міцносні та динамічні параметри знаходилися в певному діапазоні, а їх похідні за часом мали необхідні значення. Розв'язування цієї проблеми полягає у проведенні цілого комплексу досліджень з

аеродинаміки для надання транспортному апарату раціонального аеродинамічного компонування.

Методи моделювання турбулентних течій, з певною мірою умовності можна розділити на три групи: підходи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds Averaged Navier – Stokes – RANS); два класичних підходи – пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation – DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation – LES); гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів для різних областей течії [1–3].

На сьогодні найбільш поширеними підходами є методи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds Averaged Navier – Stokes – RANS). Вони замикаються за допомогою тієї або іншої напівемпіричної моделі турбулентності [4–6].

Класичні вихоророзрізняючі підходи є найбільш досконалими. Це пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation – DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation – LES). Метод DNS базується на безпосередньому прямому числовому розв'язуванні тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса з розрізненням усіх просторово-часових масштабів турбулентності. Він ґрунтується на фізичних принципах аеродинаміки і повністю вільний від емпіричних припущень.

У рамках методу LES ті ж рівняння розв'язуються безпосередньо після їх попередньої просторової фільтрації. Це дозволяє виключити з розгляду частину просторово-часових масштабів. Проведена операція дозволяє значно понизити вимоги до просторово-часового розрізнення. Таким чином понижуються вимоги до необхідних обчислювальних ресурсів.

Для урахування впливу відфільтрованих ("підсіткових") масштабів турбулентності притягуються ті або інші напівемпіричні моделі. В науковій літературі для підкреслення кардинальних відмінностей методу LES від підходів, що використовуються для замикання RANS, їх називають "підсітковими".

До третьої групи відносять гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів в різних областях течії. Вони є найбільш розповсюдженими для практичного використання, виходячи з можливостей обчислювальної техніки. У відповідності з даним підходом розрахунок турбулентних течій стисливої рідини проводиться шляхом безпосереднього розв'язування рівнянь Нав'є-Стокса осереднюються за Рейнольдсом для густини та тиску.

Незважаючи на характер осередненої течії, її вимірність та стаціонарність чи нестационарність, необхідно розв'язувати тривимірні нестационарні рівняння Нав'є-Стокса. Це пов'язано з тим, що турбулентність є принципово тривимірним і нестационарним явищем. Слід звернути увагу на те, що для ряду моделей, наприклад DNS, необхідно

забезпечити достатню точність розрізнення усіх просторово-часових масштабів турбулентності.

Перевагою рівнянь RANS перед вихідними Нав'є-Стокса є те, що вони сформульовані безпосередньо відносно осереднених за часом характеристик течії, що представляють основний інтерес в задачах аеродинаміки. Таким чином можна виключити необхідність розрахунку локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків шляхом інтегрування тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса (DNS). В реальних умовах течії, на даний час розвитку обчислювальної техніки, проведення розрахунку локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків вважаються абсолютно неможливими. Слід відзначити, що рівняння RANS є незамкнутими, оскільки вони містять невідомий тензор рейнольдсових напружень та вектор турбулентного теплового потоку. Тому для їх практичного використання потрібні додаткові співвідношення, що зв'язують ці величини з характеристиками осередненого руху. Вони можуть бути отримані тільки з використанням тієї або іншої емпіричної інформації. Ці співвідношення прийнято називати моделями турбулентності для напружень Рейнольда або для других моментів.

Альтернативний підхід до вирішення проблеми замикання рівнянь Рейнольда полягає у використанні рівнянь перенесення рейнольдсових напружень, які формально можуть бути отримані з рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою процедури осереднювання за часом аналогічно тому, як це робиться при виведенні рівнянь Рейнольда. Проте ці рівняння містять так звані моменти третього порядку ($\overline{u'_i u'_j u'_k}$). Зв'язок з параметрами осередненого руху і компонентами тензора рейнольдсових напружень (моментами другого порядку) є невідомий, і для їх визначення потрібне використання рівнянь перенесення для моментів третього порядку. Ці рівняння, у свою чергу, містять кореляції четвертого порядку і т. д., так що отримання строгої замкнутої системи рівнянь відносно статистичних характеристик турбулентності в принципі неможливе. У цій ситуації розумним компромісом видається обмеження моделювання рівняннями перенесення других моментів.

Значні успіхи в області побудови різноманітних напівемпіричних моделей турбулентності були досягнуті в 60-х, – 70-х роках минулого століття. Вони надали обманливі надії на створення універсальної RANS моделі, що може бути придатною для розрахунку будь-якої, в крайньому випадку більшості турбулентних течій.

Упродовж другої половини минулого століття науковими установами були проведені багато чисельні експериментальних і розрахункові дослідження турбулентних течій. Вони, переконливо показали, що локальні усереднені характеристики турбулентних потоків піддаються істотному глобальному впливу стійких, великомасштабних, з розмірами порядку макро-масштабу течії, принципово тривимірних і нестационарних структур.

Характеристики цих структур залежать від конкретної геометрії даної течії і межових. Таким чином, гіпотеза локальності і усереднених характеристик турбулентних потоків, на якій в неявній формі передбачалось побудувати RANS моделі турбулентності, не виконується.

Це в принципі унеможливає побудову ідеальної моделі такого типу і робить згадані вище надії на можливість побудови універсальної RANS моделі турбулентності, по суті, нездійсненними. Дана ствердження в рівній мірі відноситься як до простих моделей, що базуються на гіпотезі Буссінєса про лінійний зв'язок між тензорами рейнольдсових напруги і швидкостей деформацій, так і до моделей перенесення рейнольдсових напружень.

Найбільш яскравим прикладом течій, для яких характерне формування когерентних турбулентних структур з розмірами порядку розмірів обтічного тіла, є течії з великими зонами відриву. Саме з цієї причини результати розрахунків таких течій з використанням RANS моделей виявляються, як правило, є незадовільними.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Осереднені рівняння Нав'є-Стокса (рівняння RANS) для досконалого стисливого газу в криволінійній системі координат записані в наступному вигляді:

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{E} - \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial(\hat{F} - \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial(\hat{G} - \hat{G}_v)}{\partial \zeta} = \hat{H}, \quad (1)$$

де \hat{Q} – вектор невідомих змінних; $\hat{E}, \hat{F}, \hat{G}$ – вектори нев'язких потоків; $\hat{E}_v = \xi_x E_v + \xi_y F_v + \xi_z G_v$, $\hat{F}_v = \eta_x E_v + \eta_y F_v + \eta_z G_v$, $\hat{G}_v = \zeta_x E_v + \zeta_y F_v + \zeta_z G_v$ – вектори в'язких потоків; $\hat{H} = 1/j H$ – вектор джерельних членів.

В системі рівнянь (1) n-компонентні вектори $\hat{Q}, \hat{E}_i, \hat{F}_i, \hat{G}_i, \hat{E}_v, \hat{F}_v, \hat{G}_v$ мають відповідний вигляд в залежності від моделі турбулентності.

Вектори $\hat{Q}, \hat{E}, \hat{F}, \hat{G}, E_v, F_v, G_v$ визначаються наступними співвідношеннями

$$\hat{Q} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E_t \end{bmatrix}, \quad \hat{E} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho U u + \xi_x p \\ \rho U v + \xi_y p \\ \rho U w + \xi_z p \\ (E_t + p)U - \xi_t p \end{bmatrix},$$

$$\hat{F} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho u V + \eta_x p \\ \rho v V + \eta_y p \\ \rho w V + \eta_z p \\ (E_t + p)V - \eta_t p \end{bmatrix}, \quad \hat{G} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho W \\ \rho u W + \zeta_x p \\ \rho v W + \zeta_y p \\ \rho w W + \zeta_z p \\ (E_t + p)W - \zeta_t p \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$E_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x \end{bmatrix}, \quad F_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y \end{bmatrix},$$

$$G_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \\ u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz} - q_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

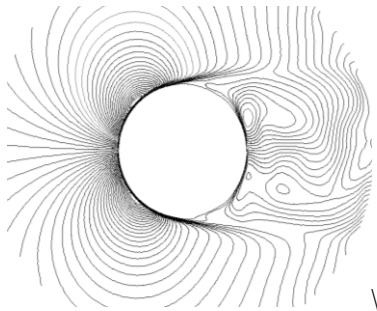
де $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \eta_x, \eta_y, \eta_z, \zeta_x, \zeta_y, \zeta_z$ – метричні коефіцієнти, $J = \partial(\xi, \eta, \zeta) / \partial(x, y, z)$ – якобіан перетворення координат, $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – компоненти тензора напружень та q_x, q_y, q_z – компоненти вектора теплових потоків.

$$E_t = \rho \left[e + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right].$$

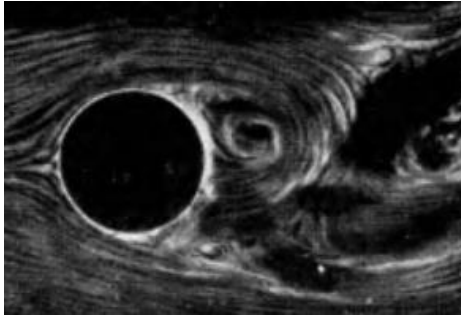
IV. РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ

Перевагою рівнянь RANS перед вихідними Нав'є-Стокса є те, що вони сформульовані безпосередньо відносно осереднених за часом характеристик течії, що представляють основний інтерес в задачах аеродинаміки. Таким чином можна виключити необхідність розрахунку локальних нестаціонарних характеристик турбулентних потоків шляхом інтегрування тривимірних нестаціонарних рівнянь Нав'є-Стокса (DNS). В реальних умовах течії, на даний час розвитку обчислювальної техніки, проведення розрахунку локальних нестаціонарних характеристик турбулентних потоків вважаються абсолютно неможливими. Слід відзначити, що рівняння RANS є незамкнутими, оскільки вони містять невідомий тензор рейнольдсових напружень та вектор турбулентного теплового потоку. Тому для їх практичного використання потрібні додаткові співвідношення, що зв'язують ці величини з характеристиками осередненого руху. Вони можуть бути отримані тільки з використанням тієї або іншої емпіричної інформації. Ці співвідношення прийнято називати моделями турбулентності для напружень Рейнольдса або для других моментів.

Для розрахунку обтікання використовувалися осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса, замкнені однопараметричною моделлю турбулентності Спаларта-Аллмараса в реалізації відокремлених вихорів [6]. На рис. 1–2 представлено результати числового розрахунку параметрів течії навколо колового циліндра. Результати розрахунку порівнюються з експериментальними даними роботи [7]. Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, використано модель турбулентності Спаларта-Аллмараса в реалізації DES. Вихідна система рівнянь записувалась та розв'язувалась в криволінійній тривимірній системі координат. Комплекс програм написано на мові програмування FORTRAN-95.

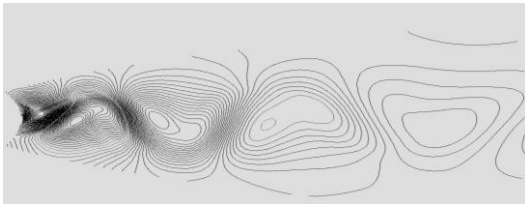


a)

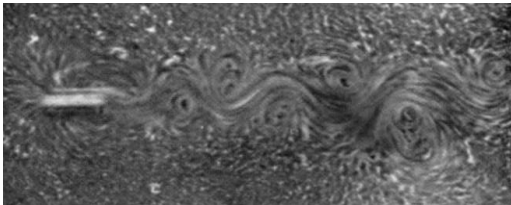


б)

Рис. 1. Турбулентна течія навколо циліндра зі сходом вихорової доріжки:
 а – розрахунок (ізолінії V), $Re=10000$;
 б – експеримент [7], $Re=10000$



a)



б)

Рис. 2. Вихорова доріжка в сліді колового циліндру:
 а – розрахунок $Re=19300$;
 б – експеримент $Re=19300$ [7]

ВИСНОВКИ

В роботі представлено розроблену методику, алгоритм та комплекс програм для розрахунку обтікання транспортного апарата турбулентним потоком. Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, використано модель турбулентності Спаларта-Аллараса в реалізації DES. Вихідна система рівнянь записувалась та розв'язувалась в криволінійній тривимірній системі координат. Комплекс програм написано на мові програмування FORTRAN-95. Проведено числове розв'язування ряду задач аеродинаміки. Результати розрахунків

порівнюються з експериментальними даними інших авторів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] P. R. Spalart. Strategies for turbulence modeling and simulations. *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2000. Vol. 21. Pp. 252–263.
- [2] J. H. Ferziger. Recent Advances in Large Eddy Simulation. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments. W. Rodi and G. Bergeles (Editors)*. 1996. Vol. 3. Pp. 163–176.
- [3] P. R. Spalart. Philosophies and fallacies in turbulence modeling. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015. Vol. 74(1). Pp. 1–15.
- [4] Сохаський А. В. До проблеми математичного моделювання турбулентних течій навколо транспортних апаратів. *Системи та технології*. 2021. Vol. 2 (62). С. 5–36.
- [5] F. R. Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32(8). Pp. 1598–1605.
- [6] P. R. Spalart and S. R. Allmaras. A one-equations turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA paper*. 1992. Vol. 0439. 21 p.
- [7] G. K. Batchelor. *An introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, 1967. 615 p.

Інформаційна система для ліквідації наднормативних кренів будівель та споруд

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.046>

Олександр Трофимчук
член.-корр. НАНУ, д.т.н., проф.,
Інститут телекомунікацій і глобального
інформаційного простору
м. Київ, Україна
Trofymchuk@nas.gov.ua

Андрій Шокарев
Лабораторія Запорізького відділення Державного
підприємства «Державний науково-дослідний
інститут будівельних конструкцій»
м. Запоріжжя, Україна
zv@ndibk.gov.ua

Сергій Заболотний
перший заступник ректора Національного
університету оборони України, начальник штабу
м. Київ, Україна
zsv@rnbo.gov.ua

Юрій Калюх
д.т.н., проф., гол.наук.співробітник
Інститут телекомунікацій і глобального
інформаційного простору
м. Київ, Україна
kalyukh2002@gmail.com

Анотація—Представлено інформаційно-аналітичну систему для ліквідації кренів будівель та споруд. У системі використовуються індуктивні датчики та перетворювачі для вимірювання осад стрічкового фундаменту, зсувів та напружень у ґрунтовій основі. Розроблено структурну схему для автоматизованого контролю параметрів. Ця система може бути використана для моніторингу та корекції технологічних осадів та крену будівель та споруд.

Ключові слова—інформаційно-аналітична система; крен; моніторинг; напружено-деформований стан.

I. ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

В доповіді представлено інформаційно-аналітичну експериментальну систему вирівнювання кренів будівель та споруд. В технологічному процесі усунення крену фундаменту для оцінки основних параметрів напружено-деформованого стану ґрунтової основи включені наступні вимірювальні перетворювачі та датчики: індуктивний датчик безперервного контролю осад стрічкового фундаменту в діапазоні до 500 мм; вимірювальний індуктивний перетворювач контролю осад на основі перетворення зсувів магнітопроводу в індуктивність у складі датчика контролю осад, що складається з двох однотипних робочого та еталонного перетворювачів; локальний індуктивний датчик контролю зсувів з вимірювальним перетворювачем; індуктивний датчик для контролю величини та спрямування головних напружень у стрічковому фундаменті на основі використання магнітопружного ефекту з автономним режимом роботи; індуктивний датчик для дистанційного контролю змін величини та напрямки нахилу стрічкового фундаменту в діапазоні до граничного значення. Для моніторингу вищезазначених параметрів розроблено структурну схему автоматизованого їх контролю. Універсальна

структурна схема включає блок безперервного розрахунку напружено-деформованого стану ґрунту в технологічному процесі усунення нахилу фундаменту, а також блок формування поточних управлінських команд. Це дозволяє визначати локальні зони ґрунту, що вимагають управлінського впливу, наприклад, на основі корекції технологічних осадів під подошвою стрічкового фундаменту. Технічні засоби, що входять до ІВС «Моніторинг»: універсальні індуктивні датчики крену і датчики розкриття тріщин (точність вимірювань 0,001 мм), діапазон температур $-30^{\circ}\dots+70^{\circ}$ С, захист від пилу і вологи (IP56); засіб знімання інформації – вимірювач індуктивності ВІІ; засіб збору і передачі інформації – блок з мобільним телефоном; комп'ютерна програма «PENDULUM» для розрахунку і візуалізації деформацій контрольованих будівельних об'єктів.

При усуненні наднормативних кренів будівель і споруд часто виникають розбіжності у величинах фактичних та прогнозованих параметрів, наприклад, технологічне осадження, крен будівельного об'єкта. Тому в проектах необхідно передбачати додаткові інженерні заходи: моніторинг у режимі реального часу, технологічні прийоми регулювання осадів по розрахунковій епюрі та ін. Це дозволить на всіх етапах виконання робіт з усунення крену будівлі забезпечувати рівність прогнозованих та фактичних деформацій системи з креном.

Для запропонованої розрахункової моделі системи «ґрунтова основа – стрічковий фундамент з креном» основними контрольованими параметрами є: товщина ґрунтової стінки між фундаментом і котлованом, глибина котловану; глибина закладання, діаметр, крок циліндричних свердловин; характер зміни технологічних осадів та крену фундаменту; коефіцієнт ідентифікації ґрунтової основи, що підробляється; величина випору ґрунту в зоні стрічкового фундаменту.

Моделювання одновимірних нелінійних об'єктів з розподіленими параметрами на основі використання оборотних simulink моделей

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.047>

Володимир Федорчук
Кафедра комп'ютерних наук
Кам'янець-Подільський національний університет
імені Івана Огієнка
м. Кам'янець-Подільський, Україна
fedvolod@kpnpu.edu.ua

Віталій Іванюк
Кафедра комп'ютерних наук
Кам'янець-Подільський національний університет
імені Івана Огієнка
м. Кам'янець-Подільський, Україна
wivanyuk@kpnpu.edu.ua

Анотація—У роботі розглядається задача комп'ютерного моделювання лінійно-протяжних одновимірних механічних об'єктів з розподіленими параметрами, які складаються з неоднорідних за фізичними параметрами областей. На основі дискретизації за просторовою координатою пропонується використання апроксимаційних моделей у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь, які ефективно реалізуються в середовищі Matlab/Simulink. Запропонований метод моделювання дає змогу отримати оборотну модель, яка уможливує застосування вхідних впливів до одних частин об'єкта і отримання відгуків для інших його частин. Крім того, отримана комп'ютерна модель дозволяє використовувати в розв'язувальних блоках нелінійні залежності.

Ключові слова—моделювання нелінійних розподілених об'єктів; оборотна Simulink-модель.

I. ВСТУП

При розв'язуванні задач проектування складних динамічних систем часто приходиться враховувати в їх моделях ефект розподіленості параметрів та нелінійні залежності. Також для забезпечення ефективного функціонування підсистем керування, контролю чи діагностики виникає необхідність використання комп'ютерних моделей самих об'єктів керування, контролю чи діагностики. Такі системи, зазвичай, складаються з неоднорідних за фізичними характеристиками елементів, включаючи нелінійні елементи, а також елементи з розподіленими параметрами [1]. Тому актуальною постає задача створення адекватних математичних моделей таких динамічних систем з урахуванням розподіленості параметрів окремих ланок, а також вимог щодо ефективної комп'ютерної реалізації отриманих моделей.

При комп'ютерному моделюванні об'єктів з розподіленими параметрами, математичні моделі яких, зазвичай, подаються у вигляді диференціальних рівнянь з частинними похідними, виникає необхідність зведення їх до такого виду, який дає змогу використовувати у програмних засобах моделювання стандартні операційні блоки.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Розглянемо математичний опис об'єкта з розподіленими параметрами у вигляді диференціального рівняння з частинними похідними

$$a(x,t) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - b(x,t) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + c(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = f(x,t), \quad (a, b, c > 0), \quad (1)$$

з граничними умовами

$$\begin{cases} u(x_0, t) = \varphi_0(t); & u(x_0 + l, t) = \varphi_l(t); \quad (t_0 \leq t \leq T), \\ u(x, t_0) = \psi_0(x); & u(x, T) = \psi_T(x); \quad (x_0 \leq x \leq x_0 + l), \end{cases} \quad (2)$$

де $\varphi_0(t)$, $\varphi_l(t)$, $\psi_0(x)$, $\psi_T(x)$ – задані функції.

Застосувавши метод прямих до рівнянь (1)-(2), отримаємо систему з n звичайних лінійних диференціальних рівнянь другого порядку та нехтуючи членами $O(h^2)$ і позначивши через $U_k(t)$ наближені значення розв'язку $u(t, x)$ на прямій $x = x_k$ для їх визначення, отримаємо систему рівнянь

$$a_k(t) \ddot{U}_k(t) - \frac{b_k(t)}{h^2} [U_{k+1}(t) - 2U_k(t) + U_{k-1}(t)] + c_k(t) \dot{U}_k(t) + d_k(t) U_k(t) = f_k(t), \quad (k = 1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

Із граничних умов маємо:

$$\left. \begin{aligned} U_0(t) &= \varphi_0(t), & (\alpha \leq t \leq T); \\ U_{n+1}(t) &= \varphi_l(t), & (\alpha \leq t \leq T); \\ U_k(t_0) &= \psi_0(x_i), & U_k(T) = \psi_T(x_k); \\ & & (k = 1, 2, \dots, n). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Отримана модель у вигляді системи диференціальних рівнянь (3) з граничними умовами (4) апроксимує з точністю до $O(h^2)$ диференціальне рівняння (1) з граничними умовами (2). За допомогою апроксимаційних перетворень вихідна модель дискретизується на n структурних елементів,

кожен з яких реалізується за допомогою звичайного диференціального рівняння другого порядку. Звичайно, систему рівнянь (3) можна розв'язувати традиційними методами, як це робиться в роботі [2], однак, більш перспективним виглядає спосіб отримання розв'язків за допомогою комп'ютерних засобів імітаційного моделювання. Тому для реалізації отриманої апроксимаційної моделі використовується simulink-модель, яка складається з n блоків (рис. 1), кожен з яких реалізує відповідне диференціальне рівняння системи (3). Особливістю цієї системи рівнянь є те, що кожне із рівнянь пов'язане з двома сусідніми рівняннями через функції $U_{k+1}(t)$ та $U_{k-1}(t)$, тому кожен блок, що реалізує k -те рівняння має один вихід $U_k(t)$, та два входи, на які подаються, відповідно, $U_{k+1}(t)$ та $U_{k-1}(t)$. Це зумовлює присутність в моделі прямих і зворотних зв'язків, які дають змогу встановити причинно-наслідкові залежності від першого блоку до останнього і навпаки, тобто simulink-модель внаслідок цього володіє властивістю оборотності.

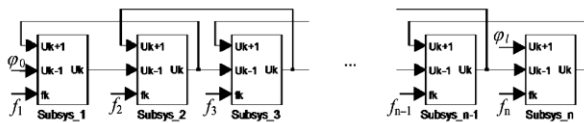


Рис. 1. Структурна реалізація апроксимаційної моделі (3)

Рівняння системи (3) описують поведінку дискретних елементів, на які розбивається неперервний розподілений об'єкт. Наприклад, для протяжного однорідного стержня, який зазнає деформації розтягу-стиску і описується моделлю (1) апроксимаційна модель (3), фактично, відображає систему n зосереджених мас, зв'язаних між собою пружними зв'язками. При цьому складові моделі (3) мають конкретний фізичний зміст: перший доданок відображає силу інерції, другий – силу пружності, третій – силу опору руху і т. д. Тому в кожне із рівнянь можна вносити додатково і нелінійні залежності, які можна легко реалізувати у відповідній підсистемі (рис. 2), яка є основою приведеної вище simulink-моделі. Наприклад, якщо сила опору руху для k -того елемента залежить від квадрату його швидкості, то в simulink-моделі це відображається співвідношенням $f_k(t) = \mu(U_k(t))^2$, де μ – деяка постійна величина. Отримана комп'ютерна simulink-модель володіє також унікальною властивістю оборотності, оскільки вона дозволяє здійснювати вхідні впливи та отримувати відгуки в будь-яких точках дискретизації лінійно протяжного об'єкта.

Також за рахунок структурної організації розв'язуючих блоків-підсистем комп'ютерної моделі є можливість моделювати неоднорідні об'єкти, які складаються з ділянок, що мають різні фізичні властивості, а також моделювати різні їх стани, наприклад, внаслідок контакту з іншим об'єктом [3].

Прикладом ефективного застосування оборотних комп'ютерних моделей є створена за описаною вище методикою модель бурильної колони бурової установки. Модель дає змогу відображати поздовжні коливання та обертальний рух колони, а також складний процес взаємодії долота із забоем.

Керуючими впливами на процес буріння є сила, прикладена зі сторони лебідки через талеву систему та момент сили зі сторони роторного столу. При цьому враховується: неоднорідність бурової колони внаслідок використання різнотипних бурильних труб; деформація бурової вишки при навантаженні та її інертність; сили опору, викликані взаємодією промивної рідини зі стінками колони; виштовхувальна сила та інерція стовпа промивної рідини; сили опору при взаємодії долота з породою.

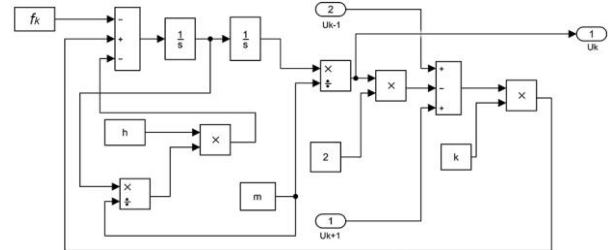


Рис. 2. Структурна реалізація підсистеми для числової реалізації k -того рівняння системи (3)

Побудована simulink-модель дала змогу розв'язати (у випадку неоднорідної за типорозмірами бурильних труб колони) ряд практичних задач, а саме: розраховувати у часі як зміщення долота за відомими зміщенням верхнього кінця колони і силою зі сторони талевої системи, так і кут його повороту за відомими обертальним моментом і кутом повороту ротора; обчислювати силу удару зубців шарошки за відомими обертальним моментом ротора та силою в точці підвісу талевої системи; розраховувати зміну моменту сили опору долота відносно сили, прикладеної до верхнього кінця колони та моменту сили роторного столу; обчислювати динаміку сил та моментів у різьбових з'єднаннях колони тощо. Розв'язування зазначених задач дає можливість комплексної оцінки динаміки бурильної колони під час буріння та опускально-підймальних роботах.

III. ВИСНОВКИ

Отже, результати моделювання свідчать, що отримана структурна simulink-модель може використовуватись як на стадії проектування обладнання бурової установки, так і на стадії компонування бурильної колони. Крім того, модель може використовуватись в системі керування при проходці свердловини для підтримки оптимальних режимів буріння та для оптимізації опускально-підйомних робіт.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Verlan A., Fedorchuk V. Models of dynamics of electromechanical systems. Kyiv : Nauk. Dumka, 2013. 222 p.
- [2] Navarro-López, E. Bit-sticking phenomena in a multi-degree-of-freedom controlled drill string. *Exploration and Production: Oil and Gas Review*. 2010. Vol. 8(2). Pp. 70–75.
- [3] Fedorchuk V., Verlan A. Computer Modelling of Drill String of an Oilwell Drilling Rig. *IEEE Xplore Digital Library. TCSET-2018*. P. 346–350. (Scopus, Web of Science Core Collection). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8336216/>

Швидкість збіжності нових алгоритмів для варіаційних нерівностей

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.048>

Олег Харьков

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики,
КНУ імені Тараса Шевченка,
м. Київ, Україна
olehharek@gmail.com

Володимир Семенов

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики,
КНУ імені Тараса Шевченка,
м. Київ, Україна
semenov.volodya@gmail.com

Анотація—Досліджено збіжність алгоритмів для розв'язання варіаційних нерівностей в гільбертових просторах. Доведено лінійну швидкість збіжності алгоритмів екстраполяції з минулого та операторної екстраполяції для варіаційних нерівностей з операторами, що задовольняють умову типу узагальненої сильної монотонності.

Ключові слова—варіаційна нерівність; лінійна збіжність; метод екстраполяції з минулого; метод операторної екстраполяції.

I. ВСТУП

Нехай H – дійсний гільбертовий простір з скалярним добутком (\cdot, \cdot) та породженою нормою $\|\cdot\|$. Розглянемо варіаційну нерівність:

$$\text{знайти } x \in C : (Ax, y - x) \geq 0 \quad \forall y \in C, \quad (1)$$

де C – непорожня опукла та замкнена підмножина простору H , A – оператор, що діє в просторі H . Будемо вважати, що оператор A є ліпшицевим на множині C (з константою $L > 0$), тобто

$$\|Ax - Ay\| \leq L\|x - y\| \quad \forall x, y \in C.$$

Задача (1) – зручна загальна форма запису різних задач, що виникають в математичній фізиці, дослідженні операцій та машинному навчанні [1; 2]. Окремі задачі негладкої оптимізації можна ефективно розв'язувати, якщо їх формулювати у вигляді сідлових задач і застосовувати алгоритми розв'язання варіаційних нерівностей. А з початком широкого використання генерувальних змагальних нейронних мереж та інших моделей змагального або робастного навчання інтерес до алгоритмів розв'язання сідлових задач та варіаційних нерівностей з'явився серед спеціалістів з машинного навчання [1]. Популярними методами апроксимації розв'язків варіаційних нерівностей (1) є алгоритм екстраполяції з минулого [1; 2] та алгоритм операторної екстраполяції [3; 4].

Мета повідомлення – ознайомити з результатами про лінійну швидкість збіжності алгоритмів для задач з операторами, що задовольняють умову типу узагальненої сильної монотонності. Для сильно монотонних та ліпшицевих операторів подібні результати отримано в [2; 5].

Припустимо, що існує єдиний розв'язок $z \in C$ варіаційної нерівності (1), а оператор A задовольняє умову

$$(Ax, x - z) \geq \mu\|x - z\|^2 \quad \forall x \in C \quad (2)$$

для деякого $\mu > 0$.

Умова (2) впливає з сильною монотонністю оператора A . Але існують немонотонні оператори з властивістю (2). Наприклад [6],

$$Ax = (2 - \|x\|)x, \quad x \in C = \{x \in \ell_2 : \|x\| \leq \frac{3}{2}\}.$$

II. ЕКСТРАПОЛЯЦІЯ З МИНУЛОГО

Розглянемо такий варіант алгоритму екстраполяції з минулого. Для $x_1 = y_0 \in H$ генеруємо послідовність елементів x_n, y_n :

$$\begin{cases} y_n = P_C \left(x_n - \frac{1}{4L} Ay_{n-1} \right), \\ x_{n+1} = P_C \left(x_n - \frac{1}{4L} Ay_n \right), \end{cases} \quad (3)$$

де P_C – оператор метричного проектування на C .

Має місце

Теорема 1. *Нехай C – непорожня опукла замкнена підмножина гільбертового простору H , $A: H \rightarrow H$ – ліпшицевий (з константою $L > 0$) на множині C оператор, існує єдиний розв'язок $z \in C$ варіаційної нерівності (1) та виконується умова (2). Тоді для породжених алгоритмом (3) послідовностей $(x_n), (y_n)$ виконується оцінка*

$$\|x_{n+1} - z\|^2 + \frac{1}{4}\|y_n - x_{n+1}\|^2 \leq \left(1 - \frac{\mu}{4L}\right)^n \|x_1 - z\|^2, \quad n \geq 1.$$

Доведення. Для схеми

$$\begin{cases} y_n = P_C (x_n - \lambda Ay_{n-1}), \\ x_{n+1} = P_C (x_n - \lambda Ay_n), \end{cases}$$

де $\lambda > 0$, запишемо нерівність [1]:

$$\|x_{n+1} - z\|^2 \leq \|x_{n+1} - z\|^2 - \|x_n - y_n\|^2 -$$

$$\begin{aligned}
 & -\|x_{n+1} - y_n\|^2 + 2\lambda(Ay_n, z - y_n) + \\
 & + 2\lambda(Ay_{n-1} - Ay_n, x_{n+1} - y_n).
 \end{aligned}$$

З умови (2) та нерівності

$$\|a + b\|^2 \leq 2\|a\|^2 + 2\|b\|^2$$

впливає

$$\begin{aligned}
 (Ay_n, y_n - z) & \geq \mu\|y_n - z\|^2 \geq \\
 & \geq \mu\left(\frac{1}{2}\|x_n - z\|^2 - \|y_n - x_n\|^2\right),
 \end{aligned}$$

а ліпшицевість A гарантує виконання нерівності

$$\begin{aligned}
 (Ay_{n-1} - Ay_n, x_{n+1} - y_n) & \leq L\|y_{n-1} - y_n\|\|x_{n+1} - y_n\| \leq \\
 & \leq \frac{L}{2}\|y_{n-1} - y_n\|^2 + \frac{L}{2}\|x_{n+1} - y_n\|^2.
 \end{aligned}$$

Використавши вищенаведені оцінки, отримуємо

$$\begin{aligned}
 \|x_{n+1} - z\|^2 & \leq (1 - \lambda\mu)\|x_{n+1} - z\|^2 - (1 - 2\lambda\mu)\|x_n - y_n\|^2 - \\
 & - \|x_{n+1} - y_n\|^2 + \lambda L\|y_{n-1} - y_n\|^2 + \lambda L\|x_{n+1} - y_n\|^2 \quad (4).
 \end{aligned}$$

Член $\|y_{n-1} - y_n\|^2$ оцінимо таким чином

$$\|y_{n-1} - y_n\|^2 \leq 2\|y_{n-1} - x_n\|^2 + 2\|y_n - x_n\|^2.$$

Ураховуючи цю оцінку в (4), приходимо до нерівності

$$\begin{aligned}
 \|x_{n+1} - z\|^2 & \leq (1 - \lambda\mu)\|x_{n+1} - z\|^2 - \\
 & - (1 - 2\lambda L - 2\lambda\mu)\|x_n - y_n\|^2 - \\
 & - (1 - 2\lambda L)\|x_{n+1} - y_n\|^2 + 2\lambda L\|x_n - y_{n-1}\|^2.
 \end{aligned}$$

Перепишемо останню нерівність у вигляді

$$\begin{aligned}
 \|x_{n+1} - z\|^2 + \frac{2\lambda L}{1 - \lambda\mu}\|x_{n+1} - y_n\|^2 & \leq \\
 & \leq (1 - \lambda\mu)\left(\|x_n - z\|^2 + \frac{2\lambda L}{1 - \lambda\mu}\|x_n - y_{n-1}\|^2\right) - \\
 & - (1 - 2\lambda L - 2\lambda\mu)\|x_n - y_n\|^2 - \\
 & - \left(1 - 2\lambda L - \frac{2\lambda L}{1 - \lambda\mu}\right)\|x_{n+1} - y_n\|^2.
 \end{aligned}$$

Для $\lambda = \frac{1}{4L}$ отримуємо

$$\begin{aligned}
 \|x_{n+1} - z\|^2 + \frac{L}{4L - 2\mu}\|x_{n+1} - y_n\|^2 & \leq \\
 & \leq \left(1 - \frac{\mu}{4L}\right)\left(\|x_n - z\|^2 + \frac{L}{4L - 2\mu}\|x_n - y_{n-1}\|^2\right).
 \end{aligned}$$

Звідки випливає потрібна оцінка. ■

З теореми 1 випливають оцінки

$$\begin{aligned}
 \|x_{n+1} - z\|^2 & \leq e^{-\frac{\mu}{4L}n}\|x_1 - z\|^2, \\
 \|x_{n+1} - y_n\|^2 & \leq e^{-\frac{\mu}{4L}n}4\|x_1 - z\|^2.
 \end{aligned}$$

III. ОПЕРАТОРНА ЕКСТРАПОЛЯЦІЯ

Розглянемо тепер варіант алгоритму операторної екстраполяції. Для $x_1 = x_0 \in C$ генеруємо послідовність елементів x_n :

$$x_{n+1} = P_C\left(x_n - \frac{1}{2L}Ax_n - \frac{1}{2(L+\mu)}(Ax_n - Ax_{n-1})\right). \quad (5)$$

Теорема 2. Нехай C – непорожня опукла замкнена підмножина гільбертового простору H , $A: H \rightarrow H$ – ліпшицевий (з константою $L > 0$) на множині C оператор, існує єдиний розв'язок $z \in C$ варіаційної нерівності (1) та виконується умова (2). Тоді для породженої алгоритмом (5) послідовності (x_n) виконується оцінка

$$\|x_{n+1} - z\|^2 \leq \left(1 - \frac{\mu}{L + \mu}\right)^n 2\|x_1 - z\|^2, \quad n \geq 1.$$

Зауважимо, що для задачі пошуку нуля сильно монотонного та ліпшицевого оператора $A: H \rightarrow H$ в [5] для алгоритму

$$x_{n+1} = x_n - \frac{1}{8L}Ax_n - \frac{1}{8L}(Ax_n - Ax_{n-1})$$

отримана оцінка

$$\|x_{n+1} - z\|^2 \leq \left(1 - \frac{\mu}{8L}\right)^n 16384 \frac{L^2}{\mu^2} \|x_1 - z\|^2, \quad n \geq 1.$$

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Семенов В. В. Варіаційні нерівності: теорія та алгоритми. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2021. 167 с.
- [2] G. Gidel, H. Berard, P. Vincent, and S. Lacoste-Julien. A Variational Inequality Perspective on Generative Adversarial Networks. arXiv preprint arXiv:1802.2018. 10551.
- [3] Y. Malitsky, M. K. Tam. A Forward-Backward Splitting Method for Monotone Inclusions Without Cocoercivity. *SIAM on Optim.* 2020. Vol. 30. Pp. 1451–1472.
- [4] V. V. Semenov, S. V. Denisov, G. V. Sandrakov, and O. S. Kharkov. Convergence of the Operator Extrapolation Method for Variational Inequalities in Banach Spaces. *Cybernetics and Systems Analysis.* 2022. Vol. 58 (6). Pp. 740–753.
- [5] A. Mokhtari, A. Ozdaglar, and S. Pattathil. A unified analysis of extra-gradient and optimistic gradient methods for saddle point problems: proximal point approach. arXiv preprint arXiv:1901.2019. 08511.
- [6] P. D. Khanh, and P. T. Vuong. Modified projection method for strongly pseudomonotone variational inequalities. *J. Glob. Optim.* 2014. Vol. 58. Pp. 341–350.

Процеси перенесення в шарі за лінійної регресійної моделі на нижній границі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.049>

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”,
м. Львів, Україна
zaliznuchna6@gmail.com

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”,
м. Львів, Україна
byixx13@gmail.com

Галина Білушак

Кафедра обчислювальної математики і програмування
Національний університет “Львівська політехніка”,
м. Львів, Україна
halyna.i.bilushchak@lpnu.ua

Анотація—Зроблена постановка та розв’язана крайова задача процесів перенесення в шарі за експериментальних даних щодо шуканої функції на нижній границі. Отримано рівняння лінійної регресії та надійні інтервали для його коефіцієнтів. Знайдено розв’язок поставленої задачі та межі надійного інтервалу для шуканої функції.

Ключові слова—крайова задача; гранична умова; лінійна регресія; надійний інтервал.

I. ВСТУП

Подальший розвиток підходів і методів математичного опису нерівноважних процесів різної фізичної природи в природних або штучних об’єктах спричинений необхідністю побудови ефективних методик і оцінок для прогнозування перерозподілу забруднень техногенного походження в об’єктах природного середовища, оцінці якості питної води та покращення її очистки в промислових масштабах, встановленні впливу дифузії агресивних речовин при оцінці надійності та довговічності експлуатації елементів і вузлів макроконструкцій для запобігання руйнування відповідних матеріалів, тощо. Такі дослідження дозволяють отримувати достовірний прогноз процесів, які протікають в об’єктах навколишнього середовища, та вчасно вживати необхідні заходи для запобігання їх негативного розвитку.

Проте, не завжди можливо коректно накласти крайові умови на границі, виходячи з фізичних міркувань, навіть в достатньо загальному вигляді. Це спричинено складністю та недостатністю проведення відповідних досліджень, і тому відсутній аналіз та необхідні узагальнення.

У даній роботі розглядається крайова задача параболічного типу, що описує процеси

перенесення тепла, маси, заряду, тощо, в шарі, коли на одній з границь наявні експериментальні дані щодо шуканої функції.

II. ПОСТАНОВКА КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ НА ГРАНИЦІ

Нехай процес перенесення в шарі товщини x_0 описується таким диференціальним рівнянням [5]

$$\rho \frac{\partial f(t, x)}{\partial t} = d \frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де ρ , d – сталі коефіцієнти, t – час, x – просторова координата.

Вважаємо, що початкова умова є нульовою

$$f(t, x)|_{t=0} = 0. \quad (2)$$

Для $t > 0$ на верхній поверхні шару діє стале джерело маси:

$$f(t, x)|_{x=0} = f_* \equiv const. \quad (3)$$

На нижній границі шару відомі експериментальні дані в N моментах часу

TABLE I

t	t_1	t_2	...	t_i	...	t_N
$f(t) _{x_0}$	$f_{x_0}(t_1)$	$f_{x_0}(t_2)$...	$f_{x_0}(t_i)$...	$f_{x_0}(t_N)$

Якщо за цими експериментальними даними побудувати лінійну регресійну модель [1; 7]

$$F(t) = at + b, \quad (4)$$

де коефіцієнти a і b знайдені методом найменших квадратів [6]

$$a = \frac{N \sum_{i=1}^N t_i f_{x_{0i}} - \left(\sum_{i=1}^N t_i \right) \left(\sum_{i=1}^N f_{x_{0i}} \right)}{N \left(\sum_{i=1}^N t_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N t_i \right)^2}, \quad (5)$$

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^N t_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N f_{x_{0i}} \right) - \left(\sum_{i=1}^N t_i \right) \left(\sum_{i=1}^N t_i f_{x_{0i}} \right)}{N \left(\sum_{i=1}^N t_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N t_i \right)^2}. \quad (6)$$

Тут $f_{x_{0i}} = f_{x_0}(t_i)$. Тоді гранична умова при $x = x_0$ набуде вигляду

$$f(t, x)|_{x=x_0} = F(t). \quad (7)$$

Якщо розглянемо випадок $N \rightarrow \infty$, то отримуємо такі асимптотичні співвідношення:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} a = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} t_i f_{x_{0i}}}{\sum_{i=1}^{\infty} t_i^2},$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} b = 0. \quad (8)$$

Значимо наступне: якщо змінюється кількість експериментальних вимірювань на тому самому часовому проміжку, то змінюються значення коефіцієнтів лінійної регресії a та b . Тобто, співставляючи (5), (6) і (8), можемо зробити висновок, що чим більший обсяг вибірки N , тим ближче кут нахилу регресійної прямої a наближається до виразу (8) і тим меншими є абсолютні значення вільного члену b .

III. ЗНАХОДЖЕННЯ РОЗВ'ЯЗКУ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ ПЕРЕНЕСЕННЯ ЗА ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ НА ГРАНИЦІ

Крайову задачу зводимо до нульових граничних умов заміною

$$w(t, x) = f(t, x) - f_* \left(1 - \frac{x}{x_0} \right) - F(t) \frac{x}{x_0}. \quad (9)$$

Тоді отримуємо наступну задачу:

$$\frac{\partial w(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial F(t)}{\partial t} \frac{x}{x_0} = D \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial x^2} \quad (10)$$

з початковою умовою

$$w(t, x)|_{t=0} = -f_* \left(1 - \frac{x}{x_0} \right) - F(t)|_{t=0} \frac{x}{x_0} \quad (11)$$

та нульовими граничними умовами

$$w(t, x)|_{x=0} = w(t, x)|_{x=x_0} = 0. \quad (12)$$

Тут $D = d/\rho$.

Застосуємо до крайової задачі (10)-(12) скінченне інтегральне sin-перетворення Фур'є [3] ($x \rightarrow y_n = n\pi/x_0$, $w(t, x) \rightarrow \tilde{w}(t, y_n)$). Тоді в зображеннях отримуємо

$$\frac{d\tilde{w}(t, y_n)}{dt} + Dy_n^2 \tilde{w}(t, y_n) = \frac{dF(t)}{dt} \frac{(-1)^n}{y_n}, \quad (13)$$

$$\tilde{w}(t, x)|_{t=0} = \frac{-1}{y_n} \left(f_* + (-1)^{n+1} F(t) \right) \quad (14)$$

Розв'язком задачі (13), (14) є наступні вираз:

$$\tilde{w}(t, y_n) = -\frac{(-1)^n}{y_n} F(t) - e^{-Dy_n^2 t} \left[\frac{f_*}{y_n} - 2 \frac{(-1)^n}{y_n} F(t) \Big|_{t=0} + (-1)^n Dy_n \int F(t) e^{Dy_n^2 t} dt \Big|_{t=0} - \frac{(-1)^n}{y_n} Dy_n^2 \int F(t) e^{Dy_n^2 t} dt \right]. \quad (15)$$

Після застосування до співвідношення (15) оберненого перетворення Фур'є з використанням (9), одержимо [4]

$$f(t, x) = f_* \left(1 - \frac{x}{x_0} \right) + F(t) \frac{x}{x_0} - \frac{2}{x_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n}{y_n} F(t) + e^{-Dy_n^2 t} \left[\frac{f_*}{y_n} - 2 \frac{(-1)^n}{y_n} F(t) \Big|_{t=0} + (-1)^n Dy_n \int F(t) e^{Dy_n^2 t} dt \Big|_{t=0} - \frac{(-1)^n}{y_n} Dy_n^2 \int F(t) e^{Dy_n^2 t} dt \right] \right] \sin(y_n x). \quad (16)$$

Якщо врахуємо, що $F(t)$ є лінійною регресією, тобто справедлива формула (4), тоді (16) можна сконкретизувати таким чином

$$(-1)^n y_n e^{-Dy_n^2 t} \int F(t) e^{Dy_n^2 t} dt = \frac{(-1)^n}{Dy_n} \left[at + b - \frac{a}{Dy_n^2} \right],$$

$$(-1)^n y_n e^{-Dy_n^2 t} \int F(t) e^{Dy_n^2 t} dt \Big|_{t=0} = \frac{(-1)^n}{Dy_n} \left[b - \frac{a}{Dy_n^2} \right],$$

$$f(t, x) = f_* \left(1 - \frac{x}{x_0} \right) + (at + b) \frac{x}{x_0} - \frac{2}{x_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n}{y_n} (at + b) + e^{-Dy_n^2 t} \left[\frac{f_*}{y_n} - \frac{(-1)^n}{y_n} (2b + at) \right] \right] \sin(y_n x) \quad (17)$$

IV. ВПЛИВ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБІРКИ НА ШУКАНУ ФУНКЦІЮ

Дослідимо на конкретних прикладах вплив статистичних характеристик вибірки експериментальних даних щодо шуканої функції на нижній границі шару. Експериментальні дані отримано для рівномірного розбиття часового інтервалу дослідження [2]. Розглянемо випадки великих і малих вибірок, які характеризуються великою або малою дисперсією.

A. Велика вибірка, велика дисперсія

Нехай вибірка експериментальних даних $F(t)$ обсягом $N = 33$ має вигляд

TABLE II

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}
t_i	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$f(t_i) _{x_0}$	0	0.1109	0.2328	0.4609	0.5213	0.8142	0.9001	0.9871	1.0012	1.0932	1.1032
	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}	t_{16}	t_{17}	t_{18}	t_{19}	t_{20}	t_{21}	t_{22}
t_i	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1
$f(t_i) _{x_0}$	1.1193	1.1245	1.1721	1.3	1.3127	1.3547	1.4012	1.4478	1.6111	1.7214	1.7651
	t_{23}	t_{24}	t_{25}	t_{26}	t_{27}	t_{28}	t_{29}	t_{30}	t_{31}	t_{32}	t_{33}
t_i	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2
$f(t_i) _{x_0}$	1.7897	2.128	2.2023	2.4137	2.4895	2.7112	2.7338	2.7672	2.8018	2.8441	2.8739

Діапазон вибірки $R = [0, 2.87]$, $R = [0, 2.8441]$, вибіркова дисперсія $S_F^2 = 0.677215$.

Побудуємо лінійну регресію за даними вибірки табл. II. За виглядом кореляційного поля робимо припущення про лінійний характер часової залежності шуканої функції на нижній границі тіла $f(t)|_{x_0}$. За вибірковими даними коефіцієнти лінійної регресії (4) є $a = 0.860186$, $b = 0.148247$.

Тепер знайдемо надійні інтервали з надійністю $\beta = 0.95$ для коефіцієнтів a та b : $a \in (0,800735; 0,922897)$, $b \in (0,036363; 0,256763)$.

Нехай $a \in [a^-, a^+]$, $b \in [b^-, b^+]$ надійні інтервали для коефіцієнтів лінійної регресії a та b .

Позначимо $\delta_a(t, x) = f_a^+(t, x) - f_a^-(t, x)$ – ширина надійного інтервалу для розв'язку крайової задачі (1)-(3), (7), де $f_a^\pm(t, x)$ – розв'язок задачі при $a = a^\pm$ відповідно; $\delta_b(t, x) = f_b^+(t, x) - f_b^-(t, x)$ – ширина надійного інтервалу для $f(t, x)$, де $f_b^\pm(t, x)$ – розв'язок задачі при $b = b^\pm$.

Графіки лінійної регресійної моделі при граничних значеннях параметрів a і b з надійних інтервалів, отриманих з надійністю $\beta = 0.95$ наведено на рис. 1.

Тут і надалі на рис.1 а наведено графіки відповідної функції, знайденої для параметрів a (суцільна лінія), a^+ і a^- (штрихові лінії), а на рис. 1 б для параметрів b (суцільна лінія), b^+ і b^-

(штрихові лінії). Зеленими крапками відзначено експериментальні дані.

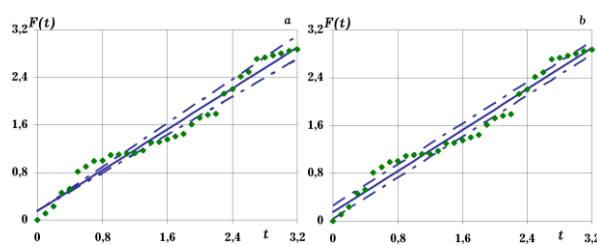


Рисунок 1. Лінійна регресія та надійні інтервали для великої вибірки з великою дисперсією

На рис. 2 показано розподіли шуканої функції та її надійні інтервали, обчислені в такі моменти часу $t = 0.1, 0.5, 2$ (криві 1-3). Криві з індексом “+” обраховані для верхніх меж надійних інтервалів, а з індексом “-” для нижніх.

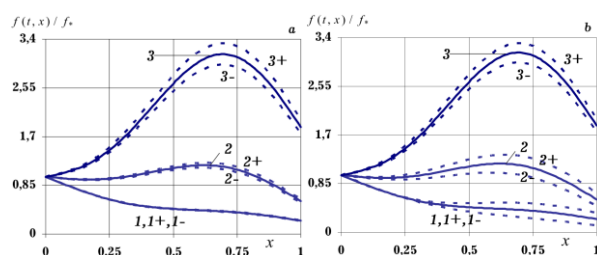


Рисунок 2. Графіки функції $f(t, x)$ та надійні інтервали для неї залежно від надійних інтервалів параметрів a та b в різні моменти часу

B. Мала вибірка, мала дисперсія

Розглянемо вибірку експериментальних даних $F(t)$ обсягом $N = 11$, яка подана в табл. III.

TABLE III

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}
t_i	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3
$f(t_i) _{x_0}$	0	0.0132	0.0201	0.0512	0.0908	0.1114	0.1433	0.1947	0.2206	0.2752	0.2908

Діапазон вибірки $R = [0, 2.87]$, $R = [0, 0.2908]$, вибіркова дисперсія $S_F^2 = 0.011019$.

Надійні інтервали з надійністю $\beta = 0.95$ обчислені для коефіцієнтів $a = 0.1043$ та $b = -0.0282$ в таких межах $a \in (0.09253; 0.116136)$; $b \in (-0.04915; -0.00725)$.

Графіки функції $F(t)$ для коефіцієнтів a та b , знайдених методом найменших квадратів (суцільні лінії) і знайдених для параметрів a^+ , a^- та b^+ , b^- (штрихові лінії), показані на рис. 3.

На рис. 4 для малої вибірки з малою дисперсією, наведеною в табл. III, показано розподіли шуканої функції та її надійні інтервали, обчислені в такі моменти часу $t = 0.1, 0.5, 2$ (криві 1-3). Криві з індексами “+” та “-” пораховані для відповідних меж надійних інтервалів.

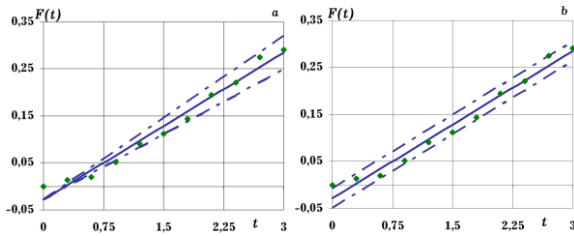


Рисунок 3. Лінійна регресія та надійні інтервали для малої вибірки з малою дисперсією

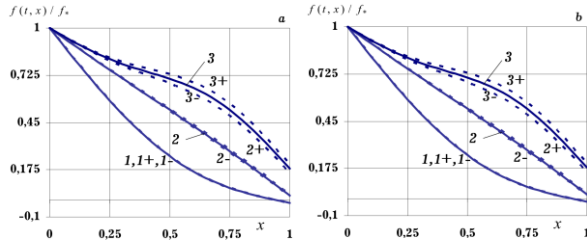


Рисунок 4. Графіки функції $f(t,x)$ та надійні інтервали для неї залежно від надійних інтервалів параметрів a та b в різні моменти часу

С. Мала вибірка, велика дисперсія

Нехай тепер вибірка експериментальних даних $F(t)$ обсягом $N = 11$ має вигляд

TABLE IV

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}
t_i	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3
$f(t_i)_{exp}$	0	0.1987	0.5384	0.9201	1.534	1.795	2.5704	2.883	2.977	3.551	3.689

Діапазон вибірки $R = [0, 2.87]$, $R = [0, 3.689]$, вибіркочна дисперсія $S_F^2 = 1.796015$.

Для даного випадку надійні інтервали для коефіцієнтів лінійної регресії (4), обчислені для $\beta = 0.95$, а саме $a = 1,33734$ та $b = -0,12814$, знайдені в наступних межах: $a \in (1,216502; 1,458176)$; $b \in (-0,342601; 0,086328)$

Графіки лінійної регресійної моделі при граничних значеннях параметрів a і b з надійних інтервалів, отриманих з надійністю $\beta = 0.95$ наведено на рис. 5.

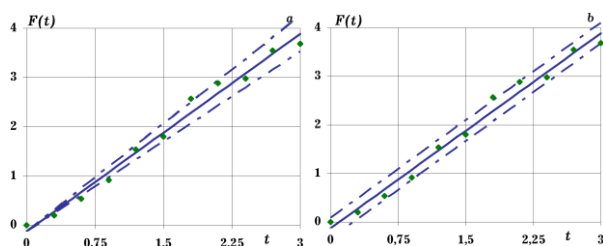


Рисунок 5. Лінійна регресія та надійні інтервали для малої вибірки з великою дисперсією

На рис. 6 для малої вибірки з великою дисперсією, наведеною в табл. IV, показано розподіли шуканої функції та її надійні інтервали, обчислені в такі моменти часу $t = 0.1, 0.5, 2$ (криві

1-3). Криві з індексами “+” та “-” порашовані для відповідних меж надійних інтервалів.

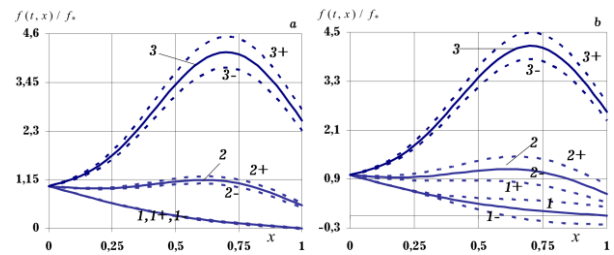


Рисунок 6. Графіки функції $f(t,x)$ та надійні інтервали для неї залежно від надійних інтервалів параметрів a та b в різні моменти часу

V. ВИСНОВКИ

Таким чином, зроблено постановку крайової задачі процесів перенесення в шарі, якщо на його нижній границі відомо експериментальні дані щодо шуканої функції в певні моменти часу. Розв’язок крайової задачі отримано за допомогою скінченного інтегрального перетворення Фур’є, коли на нижній границі тіла задано лінійну регресію, коефіцієнти якої знайдено методом найменших квадратів за заданими експериментальними даними. Встановлено надійні інтервали для коефіцієнтів рівняння регресії із заданим рівнем надійності. Визначено відповідні надійні інтервали для шуканої функції на основі отриманого розв’язку крайової задачі, причому їх межі визначено за межами надійних інтервалів для коефіцієнтів лінійної регресії.

Зауважимо, що чим більші абсолютні значення набуває шукана функція тим більшою є ширина надійного інтервалу. Для малих часів практично невідчутний вплив надійного інтервалу для параметра a , тоді як вплив надійного інтервалу для параметра b в рази більший, особливо в околі нижньої границі шару (криві 1 та 2, рис. 2 і 6). Відзначимо, що чим меншою є дисперсія вибірки експериментальних даних, тим меншою є ширина надійного інтервалу для розв’язку сформульованої крайової задачі (рис. 4).

Це дослідження було профінансовано грантом № ДР 0123U101691.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Бахрушин В. С. Методи аналізу даних. Запоріжжя : КПУ, 2011. 268 с.
- [2] Probability Theory and Mathematical Statistics / Edited by Grigelionis, De Gruyter, 2020. 624 p.
- [3] I. Sneddon. The use of integral transforms. Tata McGraw-Hill, 1979. 539 p.
- [4] Handbook of Mathematical Functions / Edited by M. Abramowitz and I. Stegun, Washington : U.S. Government Printing Office, 1984.
- [5] M. Apostol. Equations of Mathematical Physics. Cambridge : Cambridge Scholars Publishing, 2018.
- [6] E. J. Gumbel. Statistics of Extremes. Chicago : Dover Publications, 2004. 375 p.
- [7] I. Vuchkov, L. Boyadzhieva, E. Solakov. Applied Linear Regression Analysis. Moscow : Financy i statistika, 1987.



**ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

Web application for organizing bilingual presentations

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.050>

Mykhailo Boichura

Department of Computer Science
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
m.v.boichura@nuwm.edu.ua

Diana Lopatina

Department of Computer Engineering
The Faculty of Electrical Engineering and Computer
Science
National University of Water and Environmental
Engineering; Lublin University of Technology
Rivne, Ukraine; Lublin, Poland
lopatina_ak21@nuwm.edu.ua

Abstract—The importance of creating new hardware and software tools for teaching English is *substantiated*. A corresponding web application for management and edit the presentations is proposed. This can contribute to more effective bilingual education. The structure of the web application, the corresponding technology stack, the data schema are described, and the principles of working with the site are explained in general.

Keywords—ASP.NET Core, MVC, multilingual presentations, Blazor.

I. INTRODUCTION

It is difficult to overestimate the importance of English language proficiency in the modern world. This is evidenced, e.g., by various official documents of many authorities, organizations and institutions (see, e.g., the concept of foreign language education development at the National University of Water and Environmental Engineering [1]). This state of affairs is especially pronounced, e.g., among specialists in the IT sector, which brings a high level of income to the state budget. Therefore, the development of new effective methods and approaches to teaching English is a very urgent task, the delay in solving which significantly increases the level of unreceived financial benefits by the state.

The level of English teaching in higher education institutions can be significantly improved by encouraging teachers to learn the language. However, noticeable results will only be seen in the long run. An effective way to get results “here and now” is to introduce hardware and software tools for conducting classes in a foreign language. The use of English-language presentations, but with Ukrainian-language dubbing of the educational material, has become quite widespread. This allows students with different levels of foreign language proficiency to navigate the content of the lesson. However, it should be borne in mind that students who do not speak foreign languages will understand less material than others. Thus, the teacher should use 2 presentations when conducting classes: in the native language and in the foreign language. But in this case, screen demonstration becomes more complicated. Therefore, the authors of this paper have developed a web application that can be used to

duplicate the presentation given by the teacher in a fairly convenient way (Fig. 1).

II. ARCHITECTURE AND TECHNOLOGY STACK

The developed website provides opportunities, e.g., to implement the ability to conduct presentations in more languages simultaneously. Extensibility is primarily ensured by using a clean architecture [2]. In this case, the web application consists of 4 projects: UI, Core, Infrastructure, BlazorPresentation.

A. UI (User Interface) project

This project contains the entry point to the program. It also contains all the controllers, views, Bootstrap v5.1.0 files, the Identity system, etc. that are needed to interact with the site user.

B. Project Core

To ensure the use of the dependency inversion principle [2], the application core contains interfaces, as well as: models, DTOs, services, specification files, mapping settings, all interfaces available in the program, etc.

C. Project Infrastructure

In order to separate the settings for communication with the “outside world” from the rest of the logic, this project contains migration files and implements the Repository pattern [3].

D. BlazorPresentation project

The Syncfusion.Presentation package [4] is connected to the Blazor server, which allows you to build and customize tools for developing your own presentations, editing and presenting them quite efficiently. In addition, there are several JavaScript files to implement functionality that is not available in the Syncfusion.Presentation package.

E. Database

One of the most popular databases, Microsoft SQL Server 2019, was chosen to store and manage the data [5, 6]. The data schema consists of 7 main tables (Fig. 2) and 6 automatically created by the Identity system [6].

III. HOW TO WORK WITH THE SITE

When the teacher clicks on the button to add a new presentation, a dialog box appears to select a *.ppt or *.pptx file from the local disk. After successful uploading to the database, you can add a presentation in

another language. The translation can be done, e.g., automatically, using the deepL website [7]. The teacher can then select the desired presentation from the drop-down list and correct any errors that appeared during the upload of both files. All changes made are automatically entered into the database.

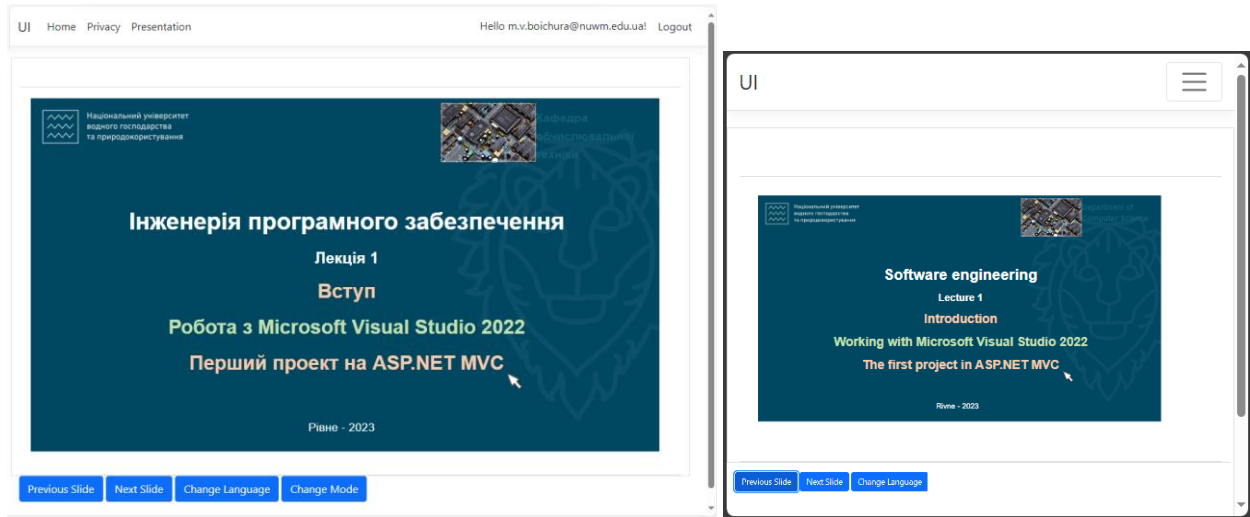


Figure 1. Teacher (a) and student (b) interfaces in a web-based bilingual presentation application

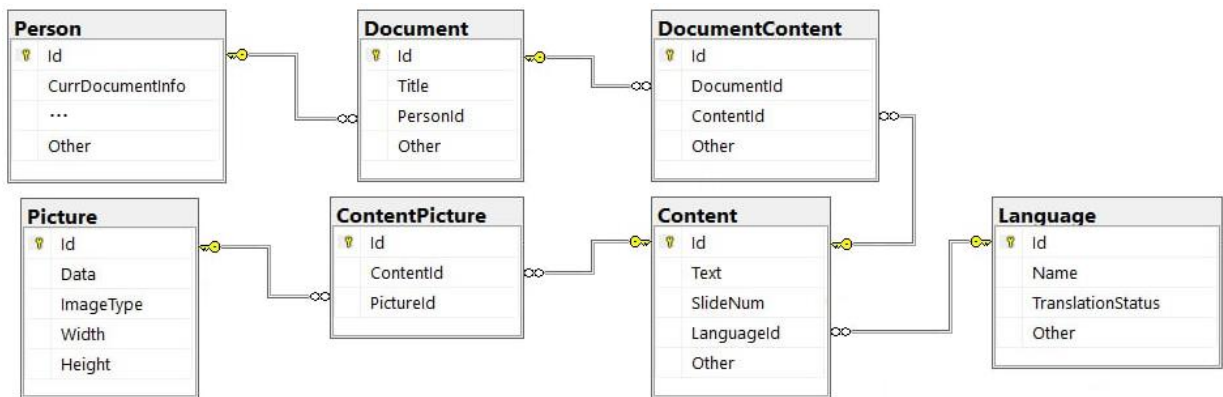


Figure 2. Data schema (data generated by Identity is not shown here)

On the webpage, the teacher can scroll through slides, change the language or modes (editing/presentation). In the presentation mode, all mouse movements or slide scrolling performed by the teacher can be seen by other users of the site. They can also independently scroll through the slides or change the viewing language.

Information about the current mouse cursor position, slide number, and current document ID is placed in the CurrDocumentInfo of the Person table.

When adding the first (of a pair) document, it adds data to all the main database tables. Whereas adding the second (of the pair) document only fills the Content and Language tables.

IV. CONCLUSIONS

A website for bilingual presentations was developed. The basic functionality of the presentation editor has been implemented. The web application is developed using modern technologies and is extensible with an adaptive design.

REFERENCES

- [1] M. I. Tadeieva, S. Y. Zubilevych, T. A. Kostiukova, A. T. Litvinchuk, and L. E. Kupchuk. Concept of development of foreign language education at the National University of Water and Environmental Engineering. [valid from 06.12.2016], Rivne : NUWEE, 2016.
- [2] R. C. Martin. Clean Architecture. A craftsman’s guide to software structure and design. USA : Prentice Hall, 2018.
- [3] Implementing the Repository and Unit of Work Patterns in an ASP.NET MVC Application (9 of 10) | Microsoft Learn. [Online]. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/mvc/overview/older-versions/getting-started-with-ef-5-using-mvc-4/implementing-the-repository-and-unit-of-work-patterns-in-an-asp-net-mvc-application/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [4] Getting Started with Essential Presentation library. [Online]. URL: <https://help.syncfusion.com/file-formats/presentation/getting-started/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [5] Microsoft SQL Server 2019. [Online]. URL: <https://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/EN-US-CNTNT-white-paper-DBMod-Microsoft-SQL-Server-2019-Technical-white-paper.pdf>. (Accessed: October 15, 2023).
- [6] A. Freeman. Pro ASP.NET Core Identity. Apress, 2021.
- [7] DeepL Translate | Найточніший у світі перекладач. URL: [https:// www.deepl.com/uk/translator](https://www.deepl.com/uk/translator). (Accessed: October 15, 2023).

An algorithm for soil identification according to the World Reference Base for Soil Resources

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.051>

Samira A.Hasanova

Laboratory of modeling and control of continuous processes

Institute of Control System

Baku, Azerbaijan

samira.hasanova75@gmail.com

Abstract—This paper addresses soil identification according to the World Reference Base for Soil Resources. A structure of the database of soil parameters of diagnostic horizons is proposed. Three variants of allocating soils to Reference Soil Groups based only on soil parameters, or on the combination of diagnostic horizons and soil parameters, or only on diagnostic horizons are considered.

Keywords—diagnostic algorithm; database structure; soil identification; soil group; diagnostic parameters.

I. INTRODUCTION

The World Reference Base for Soil Resources (WRB) [1] was developed to identify soils and use the obtained data in different areas of everyday life: agriculture, forestry, animal husbandry, etc. Note that the WRB, developed by a group of soil scientists, is not meant to replace national classification systems. Besides this classification system, there are also different soil classifications designed by national soil science schools. The difference in the structures of these classifications necessitated the development of a diagnostic algorithm to correlate them with each other. A group of scientists headed by M. Babayev also developed a national soil classification system for Azerbaijan [5]. In order to compare these two systems, this study proposes a soil data structure, as well as an algorithm for soil identification according to the WRB classification on the basis of the proposed structure.

II. PROBLEM STATEMENT

The following objectives are set in this paper:

- Development of a data structure for soil types in the Reference Soil Groups (RSG) of the World Reference Base for Soil Resources (WRB);
- Development of a diagnostic algorithm according to the WRB soil parameters on the basis of the developed data structure.

An analysis of allocating soils to a particular WRB RSG was conducted in order to construct a diagnostic algorithm. Note that WRB is a two-tier system of soil classification, with the first level containing 32 major RSGs, and the second level assigning a set of principal and supplementary qualifiers to each RSG [2–3]. Soils are allocated to RSGs on the basis of principal soil parameters. In this paper, the first level of allocating

soils to RSGs is considered. A structure of the database of principal soil parameters collected in the order of their comparison with RSGs is proposed. A diagnostic algorithm is developed for the principal soil parameters enabling the allocation of a soil to the appropriate reference base of soil resources.

III. SOIL DATA STRUCTURE

A detailed study of works of soil scientists revealed that soil parameters can be grouped into the following three classes:

- Measured directly in the field (numerical value);
- Determined by laboratory analysis (numerical value);
- Determined on the basis of expert opinion (listed variants).

A tabular structure of the soil data under consideration is proposed for conducting diagnostics. In accordance with the listed grouping, these tables can store data in interval form, in the form of specific values as well as enumerated values. The primary table contains the principal indicators identifying soil types accordingly to the RSGs. Each of the fields in the primary table of the database structure contains information about a specific soil indicator and has its own unique name and type of definition. It should also be noted that some soil parameters from the primary table are linked to auxiliary tables, which contain a full description of this parameter. For instance, a soil may contain soil materials of various types; therefore, the field in the primary table, which indicates the content of any material in the soil, is linked to the auxiliary table, which includes the names of all types of soil materials considered in the soil diagnostic algorithm.

IV. DEVELOPING THE SOIL DIAGNOSTIC ALGORITHM

When examining the soil group identifier key in the World Reference Base for Soil Resources, it was found that the description of RSGs is given in three different ways:

- 1) based only on certain soil parameters, e.g., the HISTOSOLS Reference Soil Group;

- 2) based on soil parameters and diagnostic horizons, e.g., the ANTHROSOLS Reference Soil Group;
- 3) based only on diagnostic horizons, e.g., the UMBRISOLS Reference Soil Group.

On the basis of these three variants, we propose respective soil diagnostic algorithms based on the structure of the first level soil parameter database.

In the following, we describe a functional algorithm for soil identification based directly on soil parameters. We will describe this algorithm on the example of the HISTOSOLS Reference Soil Group [4, p. 95]. The structure of this soil group belongs to the first of the variants described above. To identify a soil as a member of the HISTOSOLS group, it is sufficient to consider the following soil parameters:

- soil thickness (MOSHNOST);
- type of material in the soil (MATERIALTYPE);
- soil depth (QLUBINA);
- residual moss in the soil (OSTATOKMXA).

The database structure is proposed in such a way that it is possible to store the values of these parameters. Namely, the soil thickness parameter takes the value specified in the MOSHNOST field from the primary SOIL_INDICATE table in the database structure. The MATERIALTYPE soil parameter determines the type of material in the soil. The value of this parameter is displayed in the primary table in the MATERIAL field, which takes its value from the MATERIALTYPE auxiliary table in the form of the following numbers: 1 – organic material; 2 – ice; 3 – technic hard material. The soil parameter indicating soil depth is determined by the QLUBINA field in the primary table of the database structure. In the HISTOSOLS Reference Soil Group, this parameter takes a value between 40 and 100 cm, or ≥ 60 cm but there must be residual moss in the soil. The parameter indicating the presence of residual moss takes the value determined by the OSTATOKMXA field in the primary table.

If all the above conditions are met, the soil can be allocated to the HISTOSOLS group with respect to the first level of the identifier key to the WRB Reference Soil Groups. The described algorithm can be given in the form of a functional module in an algorithmic language (Pascal):

Function Histosols;

```
begin
  if ((MOSHNOST>=10) and
      ((MATERIALTYPE=1 or MATERIALTYPE=2 or
        MATERIALTYPE=3))) then
    begin
      if (QLUBINA>=40 or QLUBINA<=100) or
          ((QLUBINA>=60) and
            (OSTATOKMXA>=75)) then true;
    end
  end
```

```
else false;
end;
```

This function returns true if the soil belongs to the Histosols group, false if the soil does not belong to the Histosols group. Thus, the described algorithm makes it possible to identify Reference Soil Groups based directly on soil parameters.

Consider the description of the functional algorithm for soil identification by soil parameters and diagnostic horizons. We will describe this variant of the algorithm on the example of the Anthrosols reference soil group [4; p.96]. For this purpose, all diagnostic horizons included in this group were analyzed: hortic, irrigric, plaggic, terric, anthraquic, hydragric, pretic. To identify a soil as belonging to the Anthrosols group, we propose determining the parameters according to the above diagnostic horizons. The hortic horizon in the soil is examined for the following parameters:

- horizon position in the soil (UP_HORIZONT);
- type of material in the soil (MATERIALTYPE);
- Munsell color value, or lightness of soil color, (SVETLOTA);
- Munsell chroma, or saturation of soil color (NASISHENNOST);
- soil condition (SOSTOYANIYE);
- soil organic carbon (ORGUGLEROD);
- extractable P₂O₅ content (OBMENP2O5);
- soil mechanical composition (MEXSOSTAV);
- depth (QLUBINA);
- base saturation (BASESATUR);
- horizon thickness (MOSHNOST);
- signs of soil animal activity (PRIZNAKD_J).

The parameter indicating the horizon position in the soil take the value specified in the UP_HORIZONT field of the Soil Indicate primary table in the database structure. The MATERIALTYPE soil parameter takes a value similar to the first variant of the algorithm. Parameters determining the Munsell color value and chroma, and soil condition take their values from the SVETLOTA, NASISHENNOST, and SOSTOYAN_POC fields of the Soil Indicate primary table, respectively. In the hortic horizon the SVETLOTA and NASISHENNOST parameters should be ≤ 3 , provided that the SOSTOYAN_POC parameter takes the value 1, moist. The soil organic carbon parameter takes the value from the ORGUGLEROD field and should be $>1\%$ in the hortic horizon. The content of extractable P₂O₅ corresponds to the OBMENP2O5 field of the Soil Indicate primary table and should take a value of ≥ 100 mg·kg⁻¹ with the depth, "QLUBINA", taking the value equal to 25 cm and the mechanical composition of the soil, "MEXSOSTAV", taking the value corresponding to fine earth. The base saturation parameter in this horizon takes its value from the BASESATUR field of the Soil Indicate primary table and should be $\geq 50\%$. Along with these soil parameters, the algorithm also checks the thickness, MOSHNOST, of the horizon and the traces of soil animal activity,

PRIZNAKD_J. Both of these parameters take their values from the MOSHNOST and PRIZNAKD_J fields of the Soil_Indicate primary table, respectively. The thickness should be ≥ 20 cm, and the signs of soil animal activity by volume should be $\geq 25\%$. The described algorithm of the hortic diagnostic horizon can be given in the form of a functional module in an algorithmic language (Pascal):

Function hortic

```
begin
    If (HORIZONTALS=4) and (MATERIALTYPE=5)
    and (SVETLOTA<=3) and (NASISHENOST<=3)
    and (SOSTOYAN_POC=1) and
    (ORGUGLEROD>=1) and (OBMENP2O5>=100)
    and (MEXSOSTAV=2) and (QLUBINA<=25) and
    (BASESATUR>=50) and (MOSHNOST>=20)
    and (PRIZNAKD_J>=25)

    then true;
    else false;
end;
```

The parameters of the other aforementioned horizons of this soil group are described in a similar manner. As a result, a diagnostic algorithm is developed for each horizon of this soil group in the form of a functional module in an algorithmic language (Pascal). To obtain the final result of allocating a soil to a particular RSG, the described algorithm is given in the form of a functional module in an algorithmic language (Pascal) (Pascal).

The algorithm is as follows.

Function antrosols;

```
begin
    ((Hortic or iraglik or plagic or terric) and
    (moshnost >50)) or ((anthraquic or hydragric)
    and (moshnost >50)) or ((pretic and (moshnost
    >50) and (qlubina ≤ 100))

end;
```

Thus, we have described the second variant of the soil identification algorithm based on the combination of soil parameters and diagnostic horizons.

We proceed to the construction of the third variant of the algorithm, namely allocating a soil to a group based only on diagnostic horizons, on the example of the UMBRISOLS soil group [4; p.114]. In this case, parameters of the following diagnostic horizons are considered:

- umbric;
- mollic;
- hortic.

As can be seen, most of the above parameters of these horizons are determined similarly to the previous algorithm but take different values. Diagnostic algorithms were developed for each of these horizons. We will examine and describe the algorithm of soil

parameters of one of the above-mentioned horizons, the umbric horizon:

- horizon position in the soil (UP_HORIZONT);
- type of material in the soil (MATERIALTYPE);
- horizon color (CVET);
- presence of artefacts (ARTEFAKTS);
- Munsell color value (SVETLOTA);
- Munsell chroma (NASIWENOST);
- soil condition (SOSTOYANIYE);
- soil organic carbon content (ORGUGLEROD);
- particle-size distribution (QLANUMSOST);
- base saturation (BASESATUR);
- horizon structure (STRUKTUR);
- extractable P₂O₅ content (OBMENP2O5);
- horizon thickness (MOSHNOST).

As can be seen, most of the above parameters of this horizon are determined similarly to the previous algorithm, while taking different values. For instance, the soil organic carbon parameter should take a value ≥ 0.6 %. Color in this horizon is one of the main parameters identifying a soil as belonging to this group and takes the text value "brown". The values of the SVETLOTA and NASIWENOST parameters in this horizon depend on the parameter indicating soil condition, SOSTOYANIYE. If the SOSTOYANIYE parameter takes a value equal to 1, moist, then the SVETLOTA parameter will take a value of ≤ 3 , otherwise it take a value of ≤ 5 . The NASIWENOST parameter will take a value ≤ 3 with the value of the SOSTOYANIYE parameter equal to 1, moist. The ORGUGLEROD parameter will take a similar value as in the plaggic horizon. Base saturation of the soil, BASESATUR, takes a value of $<50\%$ for this horizon. The most part of the umbric horizon has acidic reaction, which results in the acidity parameter, OBMENP2O5, taking a value of < 5.5 . Horizon thickness is determined by the MOSHNOST field and takes a value of ≥ 20 cm. The following is the diagnostic algorithm of the umbric diagnostic horizon in the form of a functional module in an algorithmic language (Pascal):

Function umbric

```
begin
    If
    ((UP_HORIZONT=1) and (MATERIALTYPE=5) and
    (CVET=1) and (ORGUGLEROD≥0.6) and
    (ARTEFAKTS=1) and (SVETLOTA≤3) and
    (NASIWENOST≤3) and (SOSTOYANIYE=1) or
    ((SVETLOTA≤5) and (SOSTOYANIYE=0))) or
    ((QLANUMSOST=3) and (SVETLOTA≤5) and
    (NASIWENOST≤3) and (ORGUGLEROD≥2.5)) and
    (BASESATUR ≤50) and (OBMENP2O5 ≤5.5) and
    (MOSHNOST≥10) or (MOSHNOST≥20)

    then true
    else false
end;
```

Parameters of the next horizon of this group, the mollic horizon, take values similar to those of the umbric horizon. The algorithm of identifying a soil for this horizon is built similarly to the previous one. The only difference is the value of the BASESATUR parameter, which in this horizon takes a value of $\geq 50\%$. The final result of this variant is that when allocating soils to this group, the parameters should satisfy the values of one of these horizons. The algorithm for determining whether the soil belongs to the hortic horizon was described earlier in the second variant. The described algorithm makes it possible to identify Reference Soil Groups directly on the basis of three diagnostic horizons.

Thus, we have developed an algorithm for soil identification according to the first level of soil allocation to WRB Reference Soil Groups. Three different variants of allocating soils to WRB Reference Soil Groups have been considered.

V. CONCLUSION

Soil identification according to the World Reference Base for Soil Resources (WRB) is investigated. A

structure of the database of soil parameters of diagnostic horizons is proposed. A soil diagnostic algorithm is developed, which will allow identifying any soil type with the corresponding WRB Reference Soil Group. Three variants of allocating soils to WRB Reference Soil Groups based only on soil parameters, or on the combination of diagnostic horizons and soil parameters, or only on diagnostic horizons are considered.

REFERENCES

- [1] IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources. 1st edition. *World Soil Resources Reports*. Rome : International Society of Soil Science. 1998. Vol. 84.
- [2] IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources. 2nd edition. *World Soil Resources Reports*. Rome : FAO, 2006. Vol. 103.
- [3] IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. *World Soil Resources Reports*. Rome : FAO, 2014. Vol. 106.
- [4] IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. 4th edition. Vienna : International Union of Soil Sciences, 2022.
- [5] M. Babayev, A. Ismayilov, and S. Huseynova. Integration of the national land classification of Azerbaijan into the international system. Baku : Elm, 2017 (in Azerbaijani).

Cross-platform application for NFT tokens

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.052>

O. Hladka

Department of Computer Technology and Economic
Cybernetics
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
o.m.hladka@nuwm.edu.ua

I. Karpovich

Department of Computer Technology and Economic
Cybernetics
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
i.m.karpovich@nuwm.edu.ua

M. Opanasiuk

Master's student
National University of Water and Environmental Engineering
Rivne, Ukraine
opanasiuk_ak19@nuwm.edu.ua

Abstract—A software application has been developed, which is a platform for creating, storing, viewing and selling NFT tokens. The object of research is the process of managing NFT tokens, the subject of research is the development and implementation of the NFT token marketplace. The developed application is a micro service that includes an API for working with NFT tokens and a client part that provides a convenient way to use the marketplace for users. The backend part was developed in the C# programming language, and the frontend part uses React and Redux. OOP methods, the Git version control system, namely Github, work with multithread, asynchrony and implemented SOLID principles were used during development. The application allows users to access NFT tokens, perform various operations with them and manage tokens. The libraries used in the application ensure stability and security in the process of working with tokens. This application allows for efficient and secure exchange of NFT tokens between different systems and users. The developed software product is built according to the principle of Clean Architecture, which will provide easy further expansion of the scope of the project

Keywords—NFT tokens; blockchain technologies; cross-platform application; marketplace; software; Clean Architecture.

I. INTRODUCTION

Computer technology today plays an important role in the development of new products and services that help simplify and improve many aspects of our lives. One such innovation is the application of NFT tokens, which is a hot topic in today's world, especially in the field of cryptocurrencies and blockchain technologies. Recently, NFT tokens have become popular among artists, musicians, and other creative people, as they allow digital creations to be stored and sold as unique art objects. NFT tokens can be used to store digital assets such as music, videos, photos and other digital materials.

Non-Fungible Token (NFT) is a blockchain technology that allows the creation of digital tokens that are not fungible one-to-one. Each NFT token has its own unique identifier that allows it to be identified

as a unique object. It allows you to create digital assets that can be sold as unique pieces of art, as well as be used to store other digital assets such as music, videos, photos and other materials. NFTs solve provenance and ownership issues. In traditional art or collectibles markets, proving a work's authenticity or ownership can be a cumbersome process. However, with NFTs, the authenticity of a digital asset can be verified using blockchain technology and ownership can be easily transferred with the click of a button.

There are several types of NFT tokens used in different industries: ERC-721 tokens, which are used on the Ethereum blockchain for to create unique art objects and other digitals assets; ERC-1155 tokens for to create both unique and replaceable tokens that can be used in games and other online platforms, etc.

To facilitate the creation, management and sale of NFTs, various applications and platforms have emerged in recent years. These platforms enable users to easily create, buy, sell and exchange NFTs. In addition, many of these platforms offer features such as digital wallets, marketplaces, and artist profiles to further enhance the user experience. One such platform is OpenSea, a popular marketplace for buying and selling NFTs that allows users to create and sell their own NFTs, as well as view and buy NFTs created by others [1].

Despite the presence of such applications, the demand for platforms that allow working with NFTs is only growing. Because NFT is a revolutionary technology that has changed the art and collectibles market by enabling the creation and trading of unique, verifiable digitals assets. With the increasing popularity of NFTs, it is important for individuals and businesses to have a comprehensive understanding of their use and potential applications.

The purpose of this research is to create a client-server application for managing NFTs, and to explore how this technology is changing the way digitals assets are managed and traded. The object of the research is the microservice architecture for managing NFT tokens, and the subject of the research is the development of the NFT token management system.

II. ANALYSIS OF TECHNOLOGIES OF THE APPLICATION

A. Server technology stack

The technology stack used in the NFT token application consists of several popular and widely used web application development tools and frameworks. Since this is a client-server application, two parts were developed: backend and frontend. The backend stack includes Entity Framework Core, MS SQL Server, UnitOfWork and Repository patterns, MediatR pattern, JWT authentication, NLog logging, Swagger and the Cors engine.

Entity Framework Core is an object-relational mapping (ORM) framework that allows developers to work with databases using .NET objects, including MS SQL Server, and provides a powerful set of tools for querying, updating, and manipulating data [2].

MS SQL Server is a relational database management system that provides a highly scalable, reliable and secure platform for data storage and management. MS SQL Server supports advanced security features including role-based security, encryption and secure communication protocols, which is especially important in the context of an NFT token application that deals with sensitive data and requires a high level of security. MS SQL Server supports transactional data processing, which is crucial for the application of NFT tokens, where a transaction represents the transfer of a unique digital asset from one owner to another. MS SQL Server provides a number of advanced functionalities, including advanced analytics, machine learning and business intelligence, which were used to analyze the performance of the developed application, as well as to perform advanced analytics on the data stored in the database.

The UnitOfWork and Repository design patterns are implemented in our NFT token application using Entity Framework Core to ensure data persistence. The UnitOfWork pattern is used to manage transactions and ensure data integrity and consistency of all changes made to the database. The Repository pattern provides a way of encapsulating the logic of requests and data manipulation, that is, it is responsible for abstracting the application's data access level [3].

The MediatR pattern is a design pattern that allows you to separate communication between system components [4]. MediatR is used to implement the Command Query Responsibility Segregation (CQRS) architectural pattern in our NFT token application. The MediatR pattern is responsible for separating the sender of the request (i.e. command or request) from the recipient of the request (i.e. the handler). This pattern ensures that commands and requests are handled by separate classes, each of which has a separate responsibility. In our application, the MediatR pattern is used to implement the business logic of the application and ensures that the handler is decoupled from the sender, and allows us to change or extend the behavior of the handler without affecting the rest of the application.

Together, the UnitOfWork, Repository, and MediatR patterns provide a robust and scalable architecture for our NFT token application, and ensure

that the data access layer is abstracted, business logic is decoupled, and transactions are atomic and consistent.

JWT authentication is used in the application to securely transfer user authentication data between the client and the server. The security method uses JSON tags (JWT) to authenticate and authorize users and provides a way to securely transfer information between the client and the server. This authentication method is more secure than traditional methods such as cookies and session IDs [5].

For logging, the platform uses a flexible and extensible logging framework, NLog logging, which provides the ability to collect and store data about errors, warnings, and other events that occur during application execution, and can help diagnose and troubleshoot problems. NLog allows developers to log different types of messages with different severity levels, such as debug, info, warning, error, and fatal [6].

Swagger and Cross-Origin Resource Sharing (CORS) are two important components in our NFT token API application. Swagger is a tool that helps create API documentation, allows us to describe the structure of our API using YAML or JSON format, and automatically generates an interactive interface that developers can use to explore and test the API. This documentation is important for developers who need to integrate with our API because it provides a clear and concise overview of the endpoints, their inputs and outputs, and any authentication or authorization required [7].

One of the key benefits of using Swagger in our NFT token API application is that it helps standardize our API documentation. By defining the structure of our API using the OpenAPI specification, we can ensure that all of our endpoints are documented in a consistent manner. This makes it easier for developers to understand our API and create integrations with it.

CORS is a security mechanism used to restrict web applications from accessing resources on another domain. In our NFT token API application, we use CORS to determine which domains are allowed to access our API. This is important for security reasons as it helps prevent malicious attacks that could compromise our API or its data. In addition, CORS provides a standard cross-request control mechanism that makes it easier to implement and maintain security policies across different parts of our application.

The backend of the application is implemented in the C# programming language, which supports the multithreading required to create high-performance applications such as an NFT token application that requires real-time updates and large amounts of data processing. C# supports asynchronous programming, which allows you to write code that can be executed in parallel without blocking the main thread, resulting in faster and more efficient code [8].

The advantage of using C# for an NFT token application is its compatibility with other programming languages and frameworks. C# is designed to work seamlessly with other Microsoft technologies, such as .NET Core, which is a cross-platform, open-source framework that can be used to develop applications for Windows, Linux, and macOS. This means that the

developed NFT token application can be deployed on any platform without any problems.

The backend API part of the application is implemented according to the principle of Clean Architecture and contains 5 application levels:

- 1) allows you to save the entities that the ORM system converts into the corresponding database tables;
- 2) saves DB migrations if it is necessary to change the parameters of one of the DB tables, so that it can be done safely, without data loss; Fluent API configurations for objects will also be stored here to maintain database integrity as much as possible;
- 3) stores services, manually created exception handling classes and constants necessary for the application in its various parts, which will allow you to easily change the value of the constants only in one place of the application, without changing them throughout the project;
- 4) is a level where requests and commands implemented by the MediatR pattern are stored;
- 5) is the level of processing incoming HTTP requests, where the configuration of all application services, JWT authentication and actual controllers for processing all user requests provided by the system will take place.

B. Stack of interface technologies

The front-end part is implemented in the TypeScript programming language using JavaScript React JS libraries in connection with Redux. React JS was used to build the user interface because it is based on the concept of a virtual Document Object Model (DOM), which breaks down a complex interface into independent, reusable elements and provides fast and efficient interface updates. The Redux library was used to manage the state of the application, since the React project itself is stateless [9]. Redux offers centralized storage of application state in one place "store", which simplifies access and update of state, makes it more predictable and manageable. Redux also makes it easy to add new functionality to an application using middleware functions that can intercept and modify actions before they reach reducers that change state. This allowed us to add logging, asynchronous requests, routing, and other features to our application.

III. CONCLUSIONS

The implementation of the NFT token marketplace application involved a combination of different technologies, including Entity Framework Core, MS SQL Server, UnitOfWork and Repository patterns, MediatR pattern, JWT authentication, NLog logging, Swagger, the CORS engine on the backend, and React JS, Redux, and Typescript on the frontend.

One of the main problems during implementation were working with asynchrony and multithreaded processes. We solved this problem using the MediatR pattern, which helped us simplify the implementation of

asynchronous requests by using a mediator class to manage communication between different parts of the application.

The MediatR pattern allowed us to use of request and response objects, which simplified us to management and control of data flow. UnitOfWork and Repository helped us to simplify work with the database by providing a standard way to access the DB. These patterns have helped us ensure data consistency and reliability by providing a single point of access and control for all database operations.

Using Swagger was critical to the implementation of the NFT token API application, as Swagger provided a user-friendly interface for the application, which made it easy for us to test and interact with the API. Swagger helped us automate the generation of documentation for the API, which made it easier to maintain and update the documentation as the application evolved. The CORS mechanism was used to provide access to the API for clients from different domains. All this was achieved by setting appropriate headers that allowed cross-requests to be made to the API. The mechanism helped improve the usability of the application by allowing clients from different domains to easily access and use the API.

Thus, we have combined various technologies and skills, in particular the technology stack listed above, to create an NFT token application. We have worked for the coherence of the technology and solving problems related to asynchrony and multi-threaded processes, as a result, we have implemented an application marketplace.

REFERENCES

- [1] M. J. Price. Apps and Services with .NET 7: Build practical projects with Blazor, .NET MAUI, gRPC, GraphQL, and other enterprise technologies. Packt Publishing, 2022.
- [2] J. P. Smith. Entity Framework Core in Action. Manning, 2018.
- [3] Unit of Work in Repository Pattern. [Online]. URL: <https://www.c-sharpcorner.com/UploadFile/b1df45/unit-of-work-in-repository-pattern>. (Accessed: October 16, 2023).
- [4] A. Shvets. Dive Into Design Patterns: An ebook on design patterns and the principles behind them. [Online]. URL: <https://refactoring.guru/design-patterns/book>. (Accessed: October 16, 2023).
- [5] I. Gregorchenko. Pros and cons of JWT: a brief overview of the intricacies of this technology. [Online]. URL: <https://highload.today/jwt-auth-json>. (Accessed: October 16, 2023).
- [6] J. Trivedi. Introduction To NLog With ASP.NET Core. [Online]. URL: <https://www.c-sharpcorner.com/article/introduction-to-nlog-with-asp-net-core2>. (Accessed: October 16, 2023).
- [7] S. Pochekutov. Swagger: what is it and how to work with it? [Online]. URL: <https://highload.today/swagger-api>. (Accessed: October 16, 2023).
- [8] J. Albahari. C# 10 in a Nutshell: The Definitive Reference. O'Reilly, 2022.
- [9] .NET Technology Stack. [Online]. URL: <https://www.qat.com/net-technology-stack/>. (Accessed: October 16, 2023).

Conceptual model of the information system for the automation of personalized email distribution

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.053>

Olena Joshi

Department of Computer Technologies and Economic
Cybernetics
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
o.i.joshi@nuwm.edu.ua

Artur Joshi

Institute of Computer Technologies
Open International University of Human Development
“Ukraine”
Kyiv, Ukraine
arturjoshi.mailbox@gmail.com

Abstract—A conceptual model and information system architecture for solving the task of automating personalized email distribution is proposed.

Keywords—automated information system; electronic mailing; personalized communication channel; institutions of higher education.

I. INTRODUCTION

In the era of the development of digital technologies and the transition of education to a new level, higher education institutions need to implement new communication tools with partners, teachers, and students in order to keep up with the times and constantly develop and improve their activities. One of the effective tools of communication today is email marketing, which is gaining momentum over time, is updated and is increasingly used by organizations to increase the effectiveness of marketing activities. Email marketing is a tool for reaching out to people who use email for business or personal communication in their everyday lives [1].

All emails can be roughly divided into following groups: automatic mailing, common and official letters. The following services are used for mass email distribution: MailChimp, Sendinblue, BenchMark, Zoho Campaigns, Vertical Response, and others [1].

II. PROBLEM STATEMENT

Sending personalized emails manually involves the following steps: categorizing contacts, creating a personalized email, email subject, email content, adding attachments, if needed, or sending the email or scheduling it to be sent. The listed steps of processing one sheet require almost 1 minute of time. To date, the limit for sending mail using the Gmail service is 500 letters during the day [2]. Thus, the total duration of continuous manual processing of such a number of sheets is about 8.33 hours.

On the other hand, automated information systems for the implementation of personalized email newsletters have the following advantages: they increase the quality and efficiency of communication, contribute to the

reduction of labor intensity and time consumption, meet the requirements of individual personalized communication, contribute to the reduction of errors, allow efficient use of resources, have a professional design and are less error-prone.

Most of the email services are paid, however, most of them offer a trial version. Their comparative analysis according to such criteria as advantages and disadvantages, language of the interface and support, limitations of the free version, integration with external services, shows that today there are no services for personalized email newsletters, firstly, with a Ukrainian language interface and, secondly, which would allow mass mailing and would be relatively free.

III. ER-MODEL DESIGN

To implement an email mails sending system, the following relational database schema is proposed (Fig. 1). The entity *contact_categories* is used for contacts categorization – NUWEE (for National University of Water and Environmental Engineering contacts), FOREIGN (contacts of foreign researchers), UKRAINE (contacts of Ukrainian researchers), and PERSONAL (personal email addresses). The *contacts* entity is needed to store information about researcher contacts, including their name, surname, email address, phone number, contact category, and university. The *universities* entity contains information about universities. The *mails* entity contains all the information required for sending an email, including the subject, email body, sender's and recipient's addresses. Since email attachments are not structured data and often have binary formats, storing attachment files is not appropriate in a relational database. It is more appropriate to use blob storages such as Amazon Web Services (AWS S3) for attachment storage. However, in the relational database, we must store metadata about attachments, including the file name, type, size, storage URL path, and a reference to the email the attachment belongs to. The *schedule* entity is designed for delayed email sending and contains references to the email to be sent, as well as the date and time of sending.

To set up email sending automation, the user needs to perform the following steps:

- Log in to the system.
- Add email addresses of contacts to the list and categorize them if necessary.
- Create an email message and optionally attach any number of files.

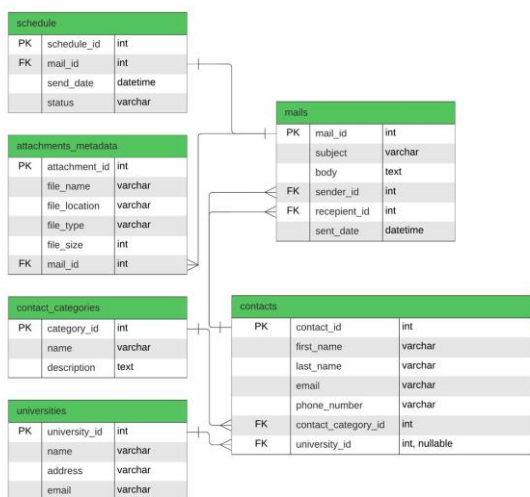


Figure 1. ER model of the information system

Select the necessary recipient addresses and specify the date and time of sending, if delayed sending is required.

IV. SYSTEM ARCHITECTURE DESIGN

Let's review the architecture of the automated email newsletter system (Fig. 2).

NUWEE cluster is a cluster consisting of any number of servers that have one of two roles:

gateway – servers, which process user requests and store data of contacts, universities, and email attachments in the relational database service (RDS), or in case of attachments, in the file storage (AWS S3);

cron-mail-sender, which periodically queries the email sending schedule database (AWS Dynamo DB), and when it finds corresponding emails, converts them into the required format for the email server and sends them using the AWS SES email sending service.

AWS S3 is a service that is capable of efficiently storing large unstructured files, which is why this service was chosen to store email attachments.

AWS RDS is a relational database service that will be used to store contacts, contact categories, emails, and attachments metadata.

AWS Dynamo DB is a NoSQL database service that is well-suited for storing unstructured data, such as the email sending schedule.

AWS SES (AWS Simple Email Service) is an email sending service that can efficiently send substantial volumes of messages using Simple Mail Transfer Protocol (SMTP) format.

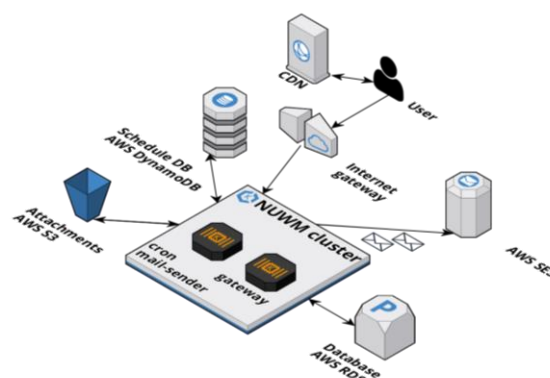


Figure 2. Architecture of the automated email newsletter system

Internet Gateway (IGW) is an infrastructure component responsible for handling user requests. Additionally, in order to improve the delivery of frontend resources, it was decided to use *AWS CDN* (AWS Content Delivery Network), which allows caching resources at locations closest to the end-user.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to the organizers of the conference MCIT and NUWEE for the inspiration for new creative ideas.

CONCLUSIONS

It is expected that the Ukrainian language automated information system for sending personalized emails will contribute to: improving the efficiency of communication and time consumption, personalization, improving the quality of communication, errors reducing, saving of the resources, tracking results, and will have a professional attitude.

REFERENCES

- [1] Y. Protsyshyn, N. Ivanekho, A. Krulevskiy. Internet marketing: email-newsletter in the educational field. *Problems of systemic approach in the economy*. 2020. vol. 3(77)-2. Pp. 134–141. URL: http://psae-jml.nau.in.ua/journal/3_77_2_2020_ukr/21.pdf
- [2] Limits for sending & getting mail - Gmail Help. [Online]. URL: <http://surl.li/ktkpj>. (Accessed: May 22, 2020).

Requirements Engineering Issues and Challenges in Ukrainian Agile-projects

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.054>

Roman Kruk

The Department of Computer Science and Applied
Mathematics
The National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
r.a.kruk@nuwm.edu.ua

Nataliia Zhukovska

The Department of Computer Science and Applied
Mathematics
The National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
n.a.zhukovska@nuwm.edu.ua

Abstract—In this paper, a review of scholarly studies related to the issues of requirements engineering in Agile as well as a survey study in the Ukrainian IT community, are carried out. This paper aims to adjust the research done on this issue, to identify the current challenges of requirements engineering in Agile and their impact on the final production. Based on the results of the analysis, further research steps are planned. This paper is a preparation for the search for a technical solution to the identified issues and challenges and contributes to the theoretical knowledge of requirements engineering problems in Agile.

Keywords—Agile; requirements engineering; software requirements; requirements issues; requirements challenges.

I. INTRODUCTION

The Agile development methodology has played a significant role in the development of the IT industry. It replaced standard software development methods at the beginning of the 21st century. Those methods such as the Waterfall model have proven ineffective in today's environment where customers demand mobility and rapid adaptability.

Agile development methodology has gained wide recognition in the IT industry [1], creating numerous frameworks such as Scrum, Kanban, XP, Lean, and others. Its effectiveness allowed it to successfully implement changes in software development.

At the same time, the adaptation of Agile to requirements engineering (hereinafter abbreviated to RE) requires deeper research into the following questions: how Agile concepts affect RE; what new issues may arise in the development process, etc. Special attention should be paid to RE in large-scale Agile projects, where RE deficiencies can reach critical mass.

The results of a primary study of the outlined topic are described in the scope of this paper. Its purpose is to identify the current issues and challenges facing RE in Agile, particularly in the Ukrainian IT industry.

II. LITERATURE REVIEW

An analysis of published papers and literature regarding the requirements engineering in Agile was conducted as the first step of the study.

The research shows that Agile improves software development productivity and reduces risks of redesign in global software development (GSD). However, Agile methods can influence requirements engineering activities and generate new challenges [2]. Agile's contribution to optimizing project productivity and resources was admitted. At the same time, it is noted that the focus on product delivery can weaken the links between design and quality control. Weak requirements engineering can lead to failed projects [4]. In such a case, on large-scale Agile projects, requirements engineering and software quality control processes may become significantly overcomplicated [5][6]. The study identified 11 challenges caused by Agile in requirements engineering, including the most common ones such as a lack of software requirements specification, unavailability of the customer to clarify requirements, inappropriate architecture built without considering future requirements, and neglect of non-functional requirements.

It was identified that the main reasons for such challenges in Agile are the changeable environmental conditions of the methodology, as well as the lack of structured and complete software specifications. The solutions proposed in the literature partially solve the identified issues, but might create an additional burden on the processes of requirements engineering.

It was concluded that Agile is effective in the short-term software development projects. However, it loses an advantage in the long term due to a number of reasons, including insufficient requirements specification.

The question of Agile requirements engineering challenges required further research and more data for analysis. However, the complexity of this subject area should be taken into consideration. The unregulated flexible nature of the methodology makes it complicated to identify common factors for further investigation. In addition, the predominant use of Agile in private enterprises and organizations limits access to projects' data, due to the "trade secrets" concept.

III. SURVEY STUDY

A. Study Planning

Further requirements engineering issues analysis in the Ukrainian IT industry was based on a survey study of the domain area. The strategy of the study, as well as

inclusive and exclusive criteria for the collected data, were developed. The following study objectives were established:

- To identify issues and challenges of the requirements specification stage;
- To identify the requirements engineering challenges impact on the commitments' fulfillment between the development team and the customer;
- To identify tools used in Agile projects to manage and store requirements.

To collect data, it was decided to utilize the experience of the Ukrainian IT segment employees working in commercial projects. The following subcategories of respondents were defined for the study:

- Requirements Managers (denoted below as RM);
- Requirements Consumers (use of requirements to create a product, denoted below as RC):
 - Software Developers (denoted below as RC-DEV);
 - Quality Control Engineers (denoted below as RC-QC).

To ensure a more independent sample of respondents for this study, a self-administered online survey was conducted in IT professional communities such as LinkedIn, DOU.UA [6] and through direct texting to private communities of the Telegram service. It was decided to use the SurveyMonkey.com online service for centralized research, questions design, answers collection, and analysis.

B. Study Conduction

The study was divided into three parts. The aim of Part #1 was to collect data about the respondent's portrait. Part #2 collected the respondents' evaluation of the qualitative characteristics of Agile projects, software requirements issues, and their impact on the final project's outcomes, based on the acquired experience. Part #3 of the study gathered information about the tools and techniques used by respondents to create and manage software requirements.

Before the main launch, a test run of the survey was conducted to obtain feedback on the clarity and relevance of the questions. As a result of the test, a number of questions were corrected. Strategy development and research design were conducted in May 2023. The test launch of the study with subsequent adjustments was carried out from May 31 to June 5, 2023. The main data collection stage was conducted over three weeks, from June 6 (sixth) to June 25 (twenty-fifth), 2023.

C. Study Findings

Most respondents (approximately 37%) had experience in the IT industry from 5 to 10 years. Significantly fewer (28%) had 3 to 5 years of experience, about 9% had less than 2 years of experience, and approximately 25% had more than 10 years of experience in the industry. The median number of projects on which respondents worked was 5 projects,

and the median was 4 projects. All respondents had an Agile project experience, and the collected data was considered valid.

Most respondents agreed that long-term Agile projects tend to get issues with requirements specifications (see Figure 1). At the same time, respondents' subcategories responses indicate that requirements consumers estimate such a trend to be much more likely than those who create and manage requirements. The most probable explanation for this effect is that requirements consumers are more likely to encounter requirements' defects and issues.

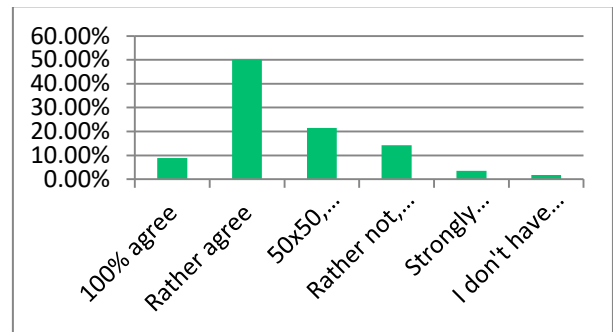


Figure 1. Responses regarding the tendency of Agile projects to get requirements issues in the long term perspective

Over 37% of respondents indicated that they face software requirements issues in every Agile project. About 23.5% indicated that such issues occur in most projects, and almost 27.5% – in every second project (see Figure 2). In particular, 83% of respondents from the RC-QC subcategory claim that every project has requirements issues, that might affect the quality control engineer job. Further research is needed to confirm this hypothesis.

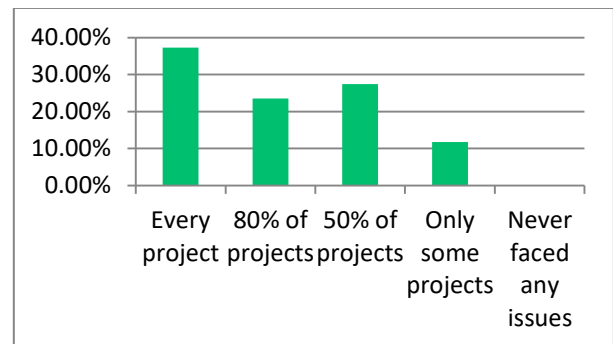


Figure 2. Responses regarding the frequency of requirements issues in Agile projects

Respondents confirm a lack of proper documentation as the root cause of Agile requirements engineering challenges. The most common issues are missing or incomplete requirements for legacy functionality (64%), inconsistency due to requirements storage in different systems (36%), and requirements traceability and decomposition, which reduces transparency (34%) (see Figure 3). Below is the legend of the indicated figure:

1. Missing/incomplete requirements;
2. Inconsistency requirements;
3. Non-structured requirements;
4. Lack of requirements audit/versioning;

5. Lack of requirements integrity;
6. Different requirements templates;
7. Lack of requirements traceability/decomposition;
8. All of the above;
9. None of the above.

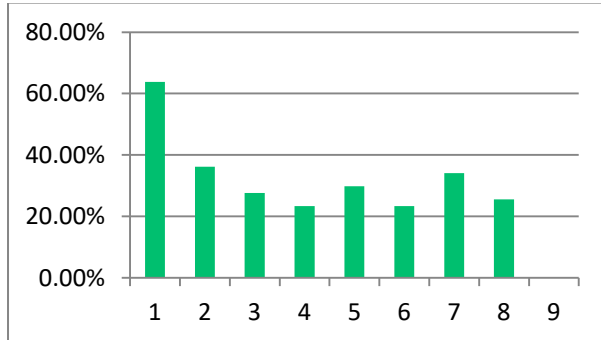


Figure 3. Responses regarding the main challenges of software requirements

Most challenges/issues were found to be of equal importance, except for the missing/incomplete software requirements and some challenges in sub-categories. In the RM subcategory, the response trend coincides with the overall result. In the RC subcategory, the role of storing requirements in different systems decreases, instead, the importance of standardized templates and requirements inconsistency increases. For the RC-DEV subcategory, the values of such challenges as "non-structured requirements" and "lack of requirements audit/versioning" that have an impact on software requirements maintenance are reduced. For the RC-QC subcategory, the importance of standardized requirements templates is 60% and is the second most important factor after the incomplete requirements.

58.7% of respondents noted the human factor to be the root cause of software requirements issues, meanwhile 15% considered the imperfection of the Agile methodology itself as the one. The responses pointed to the changeable business context and the rush as key factors in the software requirements issues emergence.

A separate challenge, already identified from the literature review analysis, is the lack of project and employees time (see Figure 4).

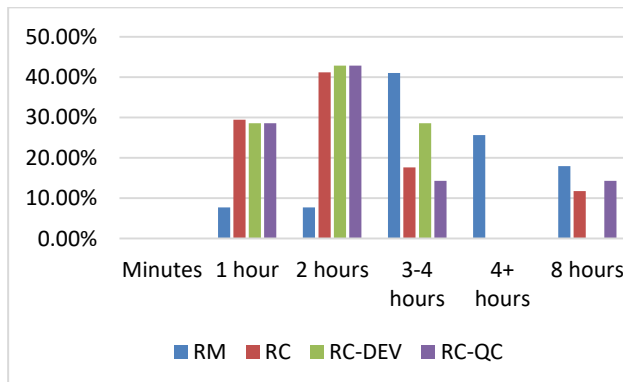


Figure 4. The average time that respondents spend working with requirements on a daily basis

Respondents in the RC subcategory tend to spend one to two hours working with the requirements, while respondents in the RM subcategory regularly work with them for three hours or more. Taking into consideration the responsibilities of the RM subcategory respondents, such a finding is expected. However, in Agile, time is a really valuable and limited resource. Reducing requirements-related time-spending can improve the working conditions and efficiency of the development team.

About 73% of respondents faced unfulfilled commitments with the client, which led to the project's deadline postponement or cancellation. About 55% of respondents emphasized software requirements issues as the main factor behind such failures (see Figure 5).

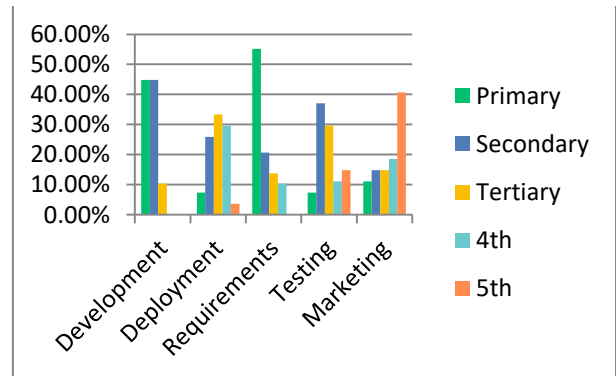


Figure 5. The influence of the main factors on the cancellation/postponement of project commitments

Almost one in two respondents indicated software requirements issues as the primary factor behind unfulfilled commitments. More than half of them encountered this phenomenon in 2/3 of all projects, and 37.5% faced it even more often. For comparison, 46% of respondents indicated development issues as the primary factor behind unfulfilled commitments in almost every project. Thus, software requirements issues take the strong secondary, if not the first place in terms of the project commitments fulfillment.

As for software requirements management tools, ten of the most popular IT systems (according to the appearance in Google Search) were provided to respondents for comparison:

1. Atlassian Jira;
2. Atlassian Confluence;
3. Trello;
4. Azure DevOps Server;
5. Jama Software;
6. ClickUp;
7. IBM Rational DOORS;
8. HelixALM;
9. iRise;
10. Microsoft Office/Google Docs/etc.

It was identified that Atlassian Jira and Atlassian Confluence are recognized as the most convenient requirements management tools on the market. However, it should be considered that neither Jira nor

Confluence are designed as tools for direct software requirements management. Atlassian Jira is a project issue-tracking system, meanwhile, Atlassian Confluence works as a corporate wiki service. Moreover, using Confluence might mean that many Agile projects move away from the original concept of using only user stories and backlog as requirements and combine Agile methods with traditional ways of managing or at least storing requirements.

IV. CONCLUSION

A survey study, conducted in the Ukrainian IT community confirmed the existence of software requirements issues, especially at the requirements specification and maintenance stages, allowed to identification of the main activity types IT employees have with software requirements, as well as requirements issues relevant to various subcategories of IT workers, related to the requirements specification in Agile projects. Also, it was identified the relationship between the requirements engineering issues and non-fulfillment of project commitments, and therefore - the direct impact of the requirements engineering effectiveness on the time and resources of the IT project. Finally, data about the current requirements engineering and management tools were collected for further analysis.

Based on the conducted literature review and study findings, it was concluded that to resolve the requirements engineering issues and challenges in Agile projects there is a need for a requirements-oriented software tool, aimed and capable of automatically managing and maintaining requirements specification. Such a system should meet the needs of IT workers and satisfy the main needs of the Agile requirements engineering. Thus, the next steps in this domain area investigation should include:

- To conduct the comparison analysis of the existing requirements engineering and

management tools to better define advantages and disadvantages of existing solutions;

- To collect requirements for the requirements management system based on available empirical data with further research and additional information gathering;
- To investigate the technical tools and technologies to define solution/implementation options of the proposed information system based on the collected requirements.

REFERENCES

- [1] M. Kassab. An empirical study on the requirements engineering practices for agile software development. *2014 40th EUROMICRO conference on software engineering and advanced applications* (Verona, 27–29 August, 2014), 2014. Pp. 254–261. URL: <https://doi.org/10.1109/SEAA.2014.77>
- [2] Z. Hoy, and M. Xu. Agile software requirements engineering challenges-solutions—a conceptual framework from systematic literature review. *Information*. 2023. Vol. 14(6). Pp. 322. URL: <https://doi.org/10.3390/info14060322>
- [3] F. Gomes De Oliveira Neto, J. Horkoff, E. Knauss, R. Kasauli and G. Liebel. Challenges of aligning requirements engineering and system testing in large-scale agile: a multiple case study. *2017 IEEE 25th international requirements engineering conference workshops* (REW, Lisbon, 4–8 September, 2017), 2017. Pp. 315–322. URL: <https://doi.org/10.1109/rew.2017.33>
- [4] I. Inayat, S. S. Salim, S. Marczak, M. Daneva, and S. Shamshirband. A systematic literature review on agile requirements engineering practices and challenges. *Computers in human behavior*. 2015. Vol. 51. Pp. 915–929. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.10.046>
- [5] K. Elghariani, and N. Kama. Review on Agile requirements engineering challenges. *2016 3rd international conference on computer and information sciences* (ICCOINS, Kuala Lumpur, 15–17 August, 2016), 2016. Pp. 507–512. URL: <https://doi.org/10.1109/iccoins.2016.7783267>
- [6] R. Kruk. Опитування: Проблеми з вимогами до ПЗ – не новина? [Online]. URL: <https://dou.ua/forums/topic/43862/>. (Accessed: October 17, 2023).

Intelligent decision support system for assessing the risk of failures of complex technical systems

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.055>

Alexey Vychuzhanin

National University «Odessa Polytechnic»
Odessa, Ukraine

Abstract—A decision support system has been developed that allows assessing the risk of failure of elements and components of complex technical systems using artificial intelligence. The proposed algorithm for the functioning of a decision support system implements the task of automating the process of assessing the technical condition of complex systems. The use of the proposed decision support system for assessing the technical condition of complex systems will improve the reliability of operating systems with insufficient information about their technical condition.

Keywords—complex technical systems; reliability; risk of failure; decision support; algorithm.

I. INTRODUCTION

To assess the reliability of complex technical systems (CTS), various methods based on the methods of probability theory and mathematical statistics have been developed and applied, which makes it possible to automate the process of assessing the reliability of elements and components of systems [1–4].

However, the stages associated with supporting decisions made to ensure reliability based on the results of its assessment for CTS are often not automated. As a result, the quality of decisions made to ensure reliability indicators of the CTS significantly depends on the qualifications of the personnel servicing the system [5].

Evolution in information processing leads to the actualization of the task of not only automating the process of assessing the reliability of elements and components of complex systems, but also to the transfer of part of the intellectual sphere of human activity to the sphere of automation of making and supporting management decisions in the field of ensuring the reliability of CTS [6].

The creation of intelligent decision support systems (DSS), in the context of progress in the field of information systems and technologies, finds significant application in solving complex, difficult to formalize problems, in particular, diagnosing the reliability of CTS.

Distinctive features of problems that are difficult to formalize are the incomplete amount of initial data of the problem being solved, inaccuracy, heterogeneity, and significant computational complexity [7].

The purpose of the study is to ensure the reliability of elements and components of operated CTS based on

the use of an intelligent DSS for assessing their technical condition.

The objectives of the study are to develop a DSS with insufficient information for assessing the technical characteristics of complex systems.

II. MAIN PART

To assess the technical condition of the CTS, a DSS is proposed. In such a system, unlike classical artificial intelligence systems, the following is carried out: modeling the subject area, and not the actions of an expert; application of probability theory and decision-making theory instead of attempts to “take into account uncertainty” using production rules of the form “IF.” For the practical implementation and operation of DSS, it is necessary to link the developed models to an expert system containing calculated, experimental, and data acquired by experts during the operation of the CTS.

To support decision-making on assessing the risk of CTS failures based on a priori and a posteriori data, as well as when searching for failed elements and system components in order to increase the efficiency of their operation, a method based on dynamic Bayesian trust networks (DBTN) is used [8; 9].

The use of DBTN makes it possible to determine with great accuracy the elements and components of the CTS that are closest to the critical state and their failure.

The task is solved by using a constant system of polling all elements of the system at its various levels for a specific period of time.

This allows, with the help of DBTN, to study extreme situations and accurately determine the critical values of the risk of failure of elements and components of the CTS.

The reliability of the STS can be assessed based on the results of diagnosing the technical condition of elements and components in the form of a risk of failure [10–12].

The construction and study of the DBTN probability of loss of performance, assessment of the risk of failure of elements and components of the CTS was carried out using the GiNIe software product [13].

The decision support strategy used when searching for failures of elements and components of ship CTS consists of a number of stages (Fig. 1).

The developed DSS operates in the following decision support modes:

- mode of integral assessment, in which the system indicates the possible degrees of risk of failure of elements and components of the vehicle at different times. Evaluates their criticality. Forms recommendations for the restoration or replacement of elements and components depending on their impact on the CTS;
- differential assessment mode, in which the system evaluates each of the hierarchies of technical systems according to the category “system-element”. Generates recommendations similar to the first mode;
- search mode, in which the system models possible malfunctions and failures of elements and components with various target search functions. The goals of the search are to find critical and vulnerable points of the system, to evaluate various options for preventing the system.

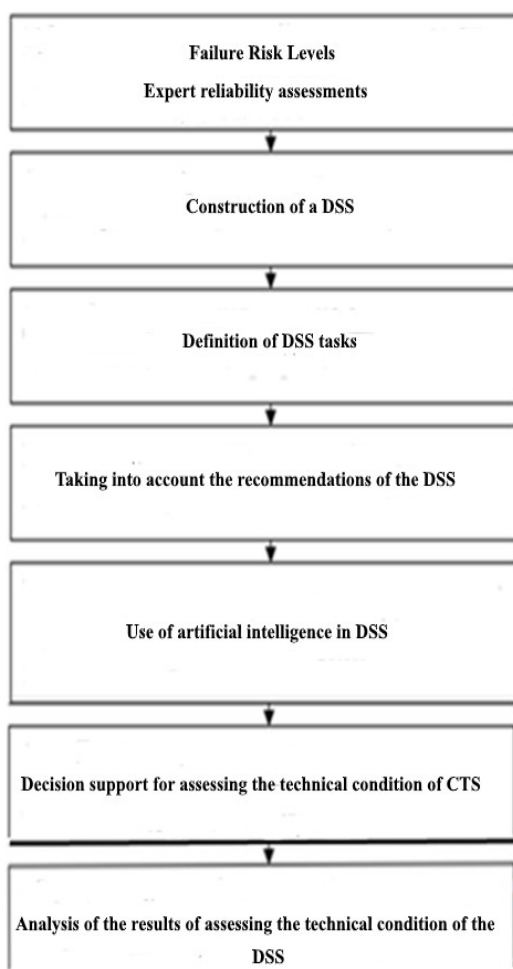


Figure 1. Decision support strategy when searching for failures in STS

The model of an intelligent system m for assessing and predicting the risk of failure of components of a complex technical system in the form of a DBTN can be written as follows:

$$\langle M, S, R, L \rangle,$$

where M – is the set of subsystems (elements) of the CTS; S – a set of intersystem (interelement) links of CTS; R – a set of diagnostic assessments of the risk of failures of subsystems (elements), intersystem (interelement) links of CTS; L – mapping of connections between the sets M , S and R , based on the CTS diagnostic model.

The initial data for constructing an intellectualization model for assessing the technical condition of complex systems using the example of a ship power plant (SPP) are: the diagram and principle of operation of the system; probability of failures of system elements and components [14].

When modeling the DBTN SPP (Fig. 2), for various values of the risk of failure of a component at the input of the network, the values of the risk of failure of functionally interconnected elements and components were determined for 20,000 hours of operation of the SPP.

Symbols of elements and components of the control system in DBTN (Fig. 2): Fire fighting system – FFS; Remote automated control system of the main engine – RACHME; Main engine – ME; Control system for propulsion and steering complex – CSPSC; Transfer of power from the main engine to the propeller – TRMER; Propulsion and steering complex – PSC.

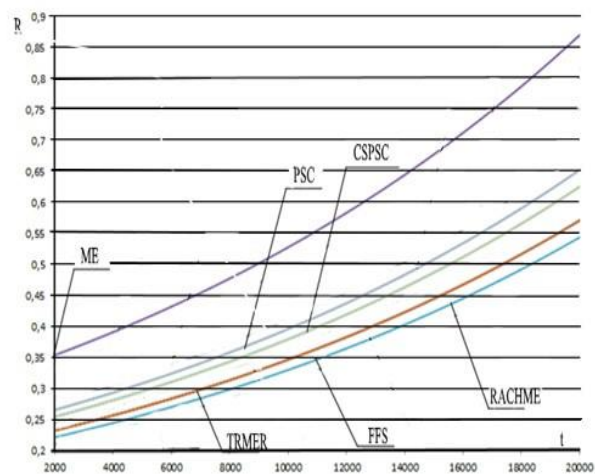


Figure 2. Risk of failure of elements and components of the power plant

The intended purpose of using DBTN in assessing the risk of failure of elements and components of CTS is a posteriori conclusion.

A priori data are converted into a posteriori assessment of the risk of failure, which in turn is a priori information for processing new information. The posterior inference is based on the data analysis procedures resulting from the use of DBTN.

The proposed principle of operation of an intelligent system, its structure using the example of an SPP, reflected in the method and model for assessing the risk of failure of elements and components of the CTS, should be considered as conceptual.

The described method, the presented model of an intelligent system for assessing the risk of failures of

STS on network infrastructures, as a result of the studies carried out, confirmed the relative insensitivity to incomplete data of elements and components of the system.

The functioning of the developed DSS is based on an assessment of the risk of failure of elements and components of the CTS. Those on criteria that reflect taking into account the specifics of the interaction of various elements and components, the correlation of changes in the values of their parameters under various emergency operating conditions of a complex system.

Application of the obtained research results allows us to ensure:

- formation of principles for the construction and operation of an intelligent system for diagnosing and predicting the risk of CTS failures;
- creation of an intellectualization model for assessing the technical condition of the risk of CTS failures based on diagnostic criteria, which is relatively insensitive to incomplete technological data of elements, components of complex systems;
- creation of an intellectualization model for assessing technical condition, based on the use of a priori information about failures, connecting the types of states of elements, components of complex systems and their diagnostic features in the form of failure risk;
- identifying the most vulnerable elements and components of the CTS and solving the problem of determining the causes of their failures depending on the risk of failures when diagnosing the technical condition of systems.

III. CONCLUSION

The results of developing a diagnostic model for a complex technical system with incomplete technological data and its implementation in an intelligent system for assessing the risk of failure of elements and components using the example of a ship's CTS made it possible to obtain a priori information about the technical condition.

Types of technical condition of elements, components are identified on the basis of diagnostic features of a complex system using the example of a ship power plant.

The technical condition of a complex system was assessed using a posteriori inference in Bayesian belief networks. In the course of the research, the results of the functioning of the intelligent system for diagnosing the risk of failures of the CTS, which allows identifying the most vulnerable elements and components of the system, were assessed.

The presented model for assessing the risk of failure of elements and components can be considered as a conceptual model of an intelligent system for assessing failures of complex technical systems on network infrastructures, which is relatively insensitive to incomplete technological data.

The use of the developed method and model when searching for the causes of failures in complex technical systems makes it possible to control the values of the risk of failures in systems when information about failures in their structures is received.

REFERENCES

- [1] I. Lazakis. Advanced ship systems condition monitoring for enhanced inspection, maintenance and decision making in ship operations. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. Pp. 1679, 1688. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.133>.
- [2] V. Vychuzhanin, and N. Rudnichenko. Assessment of risks structurally and functionally complex technical systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Vol. 1(2). Pp. 18–22. URL: <https://doi.org/10.15587/729-4061.2014.19846>
- [3] ISO 13381-1:2015. Condition monitoring and diagnostics of machines – Prognostics – Part 1: General guidelines. [valid from 2015-03-01], Vernier: ISO copyright office, 2015.
- [4] V. Vychuzhanin, and N. Rudnichenko. Metody informatsionnykh tekhnologiy v diagnostike sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Odesa : Ekologiya, 2019.
- [5] M. Zhang, J. Montewka, T. Manderbacka, P. Kujala, and S. Hirdaris. A Big Data Analytics Method for the Evaluation of Ship - Ship Collision Risk reflecting Hydrometeorological Conditions. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 213. 107674. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107674>.
- [6] V. Vychuzhanin, N. Shibaeva, A. Vychuzhanin, and N. Rudnichenko. Intellectualization Method and Model of Complex Technical System's Failures Risk Estimation and Prediction. *The Six International workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2023, May 12, 2022)*, Zaporizhzhia, Ukraine. CEUR Workshop Proceedings, 2023. Vol. 3392. Pp. 130–140.
- [7] A. Vychuzhanin. Intelligent system for assessing and forecasting the risk of failure of components of a complex technical system. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2022. Vol. 12(3). Pp. 154–161. URL: <https://doi.org/10.15276/imms.v12.no3.154>.
- [8] F. Jensen. *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Berlin : Springer, 2007.
- [9] C. R. Wang, and C. Guan. A Bayesian inference-based approach for performance prognostics towards uncertainty quantification and its applications on the marine diesel engine. *ISA Transactions*. 2021. Vol. 118. Pp. 159–173.
- [10] IEC 31010:2019. Risk management — Risk assessment techniques. [valid from 2019-06]. Geneva : IEC Central Office, 2019.
- [11] N. Rudnichenko, V. Vychuzhanin, A. Polyvianchuk, and V. Mateichyk. Complex Technical System Condition Diagnostics and Prediction Computerization. *The Six International workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020, April 27 - May 1, 2020)*, Zaporizhzhia, Ukraine. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2608. Pp. 42–15. URL: <https://doi.org/10.32782/cm/2608-4>.
- [12] M. Asuquo, J. Wang, and L. Zhang. An integrated risk assessment for maintenance prediction of oil wetted gearbox and bearing in marine and offshore industries using a fuzzy rule base method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M. Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2020. Vol. 234(2). Pp. 313–331. Doi: 10.1177/1475090219899528.
- [13] Genie9: Making Local Backup Easy and Affordable - Genie9. [Online]. URL: <https://www.zoolz.com/genie9/>. (Accessed: September 19, 2023).
- [14] D. Boullosa-Falces, and L. Barrena. Monitoring of fuel oil process of marine diesel engine. *Appl. Therm. Eng.* 2017. Vol. 127. Pp. 517–526.

Analysis of the problem of monitoring the concentration of Carbon Dioxide in Smart Home. Methods for measuring Carbon Dioxide

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.056>

Arsenii Zyma

Department of Computer Sciences
Sumy State University
Sumy, Ukraine
senii.zima@gmail.com

Oleh Berest

Department of Computer Sciences
Sumy State University
Sumy, Ukraine
o.berest@cs.sumdu.edu.ua

Abstract—The demand for efficient environmental monitoring rises as smart houses become increasingly interwoven into our daily lives. The carbon dioxide concentration is one of the most crucial variables for indoor air quality and energy efficiency. This article addresses several ways for measuring carbon dioxide levels, including measurements with chemical, optical, and electrochemical sensors, as well as the difficulties that come with carbon dioxide monitoring in smart homes. Users can choose carbon dioxide monitoring solutions for smart home systems in an informed manner by being aware of the advantages and disadvantages of different techniques.

Keywords—carbon dioxide in smart home systems; measuring carbon dioxide levels; difficulties in carbon dioxide monitoring; smart home, methods for monitoring carbon dioxide.

I. INTRODUCTION

Contemporary housing is increasingly characterized by smart houses, offering convenience, energy efficiency, and better standards of life. These residences have a range of sensors that enable occupants to keep an eye on a number related factors, such as lighting, heating, and security.

Indoor air quality, is a crucial component of smart home technology that is frequently disregarded and has significant effects on health and fitness. The level of carbon dioxide – CO₂ (carbon dioxide) is one of the most important factors to consider when evaluating indoor air quality.

Poor ventilation can cause elevated carbon dioxide levels, which can cause pain, exhaustion, and even health problems. Therefore, maintaining a healthy and cozy interior atmosphere in smart homes requires constant monitoring of CO₂ levels.

This article reviews several CO₂ measurement techniques and examines the difficulties that come with monitoring CO₂ levels in smart homes.

II. CHALLENGES IN MONITORING CARBON DIOXIDE IN SMART HOME

There are various difficulties with measuring CO₂ levels in smart homes, including:

Accuracy: To maintain indoor air quality, accurate CO₂ readings are essential. Inadequate ventilation or wasteful energy use might result from inaccurate measurements.

Cost: A wide spectrum of households should be able to buy and use smart home technology. For wide use, cost-effective CO₂ monitoring methods are required.

Power use: To reduce the need for frequent battery changes or excessive power use, smart home sensors should perform well.

Integration: For efficient automation and control, CO₂ sensors must symbiotically work with other smart home systems and devices.

III. MEASUREMENT TECHNIQUES FOR CARBON DIOXIDE

There are several ways to measure CO₂ levels in systems smart home, each with benefits and drawbacks.

Here are three typical approaches:

Nondispersive infrared sensor – NDIR (Nondispersive infrared sensor) measures CO₂ using infrared sensors to track the amount of infrared light absorbed by CO₂ molecules. They are excellent for long-term monitoring and provide high accuracy. However, compared to other types of sensors, they are often more expensive and energy intensive.

Optical sensors – more especially colorimetric sensors, depend on a material's ability to change color in response to changes in CO₂ concentration. These sensors are useful for battery-powered smart home devices due to their low power consumption and cost-effectiveness. However, their precision and long-term stability may be constrained.

Electrochemical sensors – use a chemical reaction between CO₂ and an electrolyte to generate a measurable electrical signal. These sensors are renowned for their precision and little power usage. They may be incorporated into systems for smart homes and are frequently utilized in portable devices. They could, however, need routine calibration and sensing element replacement.

IV. AUTOMATIC TRAINING FOR PROCESSING SENSOR DATA

Real-time data analysis and interpretation capabilities of machine learning and artificial intelligence algorithms allow for the provision of useful information as well as more precise and reliable performance outcomes.

The advantages of processing sensor data automatically with model learning include interpretation of data. In CO₂ data, machine learning algorithms can identify patterns and trends that human observers might not instantly see. This enables you to comprehend the dynamics of indoor air quality more thoroughly.

Predictive management then Smart home systems can forecast changes in ventilation and climate control systems by continually evaluating CO₂ levels together with other environmental data such as temperature and humidity. This predictive method keeps indoor air quality at its best while using the least amount of energy possible.

Automation that adapts to changing circumstances and user preferences. For instance, depending on past data and feedback from customers, they may figure out how frequently and when to modify ventilation intensity.

Detection of Anomalies or unexpected CO₂ emissions may be a sign of ventilation issues, broken equipment, or even the presence of contaminants, and may be picked up on by machine learning models. Alerts or remedial measures may be triggered by early detection.

Automatic training may optimize energy consumption, lowering expenses and having a less negative impact on the environment by intelligently adjusting ventilation, heating, and cooling systems depending on CO₂ levels.

Even though automated model training offers many advantages, it's crucial to realize that in order for these

models to be flexible enough to respond to changing circumstances, they need big, high-quality training datasets. When employing automatic model to evaluate sensor data in smart homes, problems relating to privacy and data security must also be taken into consideration.

V. CONCLUSION

Monitoring CO₂ levels in smart homes is important for maintaining indoor air quality and energy savings. There are several methods to measure CO₂ levels, and each has advantages and disadvantages. When selecting CO₂ monitoring systems, users and developers should take into account elements like accuracy, price, power consumption, and integration.

It is important to keep in mind that, in addition to choosing the right sensor technologies, automated model training may considerably enhance how these sensors handle data. The addition of automatic learning of CO₂ sensor models into smart homes represents an exciting step toward improving indoor air quality and energy efficiency. We may anticipate more complex and potent methods of monitoring and regulating CO₂ levels in our houses as technology develops.

REFERENCES

- [1] Y. Jiang, S. Lian, and S. Liu. Design and Implementation of Smart-Home Monitoring System with the Internet of Things Technology. *Wireless Communications, Networking and Applications*. 2016. Pp. 473–484.
- [2] M. Barba, et al. A Review on Carbon Dioxide Monitoring in Buildings. *Sensors (Basel)*. 2021. Vol. 21(4). Pp. 1254.
- [3] H. Pardo et al. Carbon Dioxide Sensors: A Review of Technologies and Applications. *Sensors (Basel)*. 2019. Vol. 19(17). Pp. 3695.
- [4] R. C. Gupta et al. Design of a Low-Cost CO₂ Monitoring System for Smart Buildings. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 122809–122819.
- [5] J. Kim et al. A Smart Home Energy Management System with CO₂ Concentration Prediction Based on Long Short-Term Memory Neural Network. *Energies*. 2020. Vol. 13(6). Pp. 1412.

Карта відображення повітряної обстановки розподіленої акустичної системи виявлення та супроводження літальних апаратів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.057>

Антон Кіцера

Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Національного університету «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
antonkitsera@gmail.com

Олексій Сечко

Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Національного університету «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
sechko.a@gmail.com

Роман Кочан

Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Національного університету «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
roman.v.kochan@lpnu.ua

Анотація—У сучасному світі важливість виявлення та супроводження літальних апаратів зростає, особливо з урахуванням швидкого розвитку безпілотних літальних апаратів. У дослідженні розглядається проблема виявлення цих апаратів та можливість інтеграції системи виявлення з іншими системами спостереження для підвищення її ефективності. Проаналізовано та описано існуючі аналогічні рішення. Основна частина дослідження присвячена розробці та тестуванню програмного забезпечення, яке використовує сучасний стек технологій для відображення та аналізу геоданих.

Ключові слова—акустичні сенсори; повітряні цілі; літальні апарати; геоінформаційна система.

I. ВСТУП

1.1. Актуальність теми

Захист громадян є однією з основних функцій держави. Особливо гостро ця проблема постає під час військових дій. Після початку широкомасштабного вторгнення Росії в Україну особливо гостро постала проблема захисту населення та інфраструктури від засобів повітряного нападу типу безпілотні літальні апарати, крилаті та балістичні ракети по всій території України. Вирішення цієї проблеми має два аспекти:

1. Виявлення та супроводження засобів повітряного нападу;
2. Їх знищення.

Проблему виявлення та супроводження засобів повітряного нападу в Україні забезпечується радіотехнічними військами, що мають на озброєнні ансамбль радіолокаційних станцій, спільним недоліком яких є відносно мала дальність виявлення маловисотних цілей, яка в найкращому випадку не перевищує 40 км [1]. Тому наявними на озброєнні засобами неможливо забезпечити суцільне покриття території України, а збільшення

їхньої кількості до необхідної, зважаючи на складність виробництва та експлуатації радіолокаційних станцій, є малоімовірним.

Дослідну експлуатацію проходить розподілена система «Звук», що складається з множини мікрофонів розподілених по території України, що моніторять акустичний стан навколишнього середовища, розпізнають сигнали, що генеруються двигунами крилатих ракет та безпілотних літальних апаратів і передають інформацію про їх наявність в спеціалізовану комп'ютерну мережу [2]. Заявлена дальність виявлення цілей типу крилата ракета складає 7 км., безпілотний літальний апарат – 3 км. Недоліком цієї системи є те, що мікрофони цієї системи фактично є детекторами наявності цілі, тобто похибка вимірювання координат цілей рівна дальності дії мікрофонів, яка є надто великою для цілевказання вогневим групам озброєними зенітними кулеметами.

Отже, актуальною є проблема розробки та впровадження точніших засобів виявлення і супроводження засобів повітряного нападу, особливо безпілотних літальних апаратів.

1.2. Завдання дослідження

Основною метою дослідження є розробка програмного забезпечення, що дозволить використовувати інтерактивну карту для відображення даних від акустичних сенсорів, які виявляють повітряні цілі. Дослідження також передбачає аналіз існуючих підходів до вирішення даної проблеми та розробку нового підходу на основі програмного забезпечення.

II. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИВЧЕННЯ ПРОБЛЕМИ

2.1. Принципи роботи розподілених акустичних систем виявлення

Повітряна обстановка є ключовим елементом у контексті національної безпеки та обороноздатності. З розвитком технологій

літальних апаратів, включаючи безпілотні літальні апарати (БПЛА), з'являється потреба в їх ефективному виявленні та супроводженні.

1. Акустичне виявлення – акустичні системи виявлення базуються на реєстрації звукових хвиль, які випромінюються літальними апаратами. Вони можуть виявляти джерела звуку на відстанях, де інші методи (наприклад, радіолокаційні) можуть бути неефективними або заблокованими.
2. Розподілені системи – розподілені системи складаються з множини сенсорів, розташованих на великій території. Ці сенсори можуть працювати в єдиному інформаційному просторі, що дозволяє отримувати більш точну інформацію про об'єкти в повітрі.
3. Відображення на карті – інтеграція даних з розподілених сенсорів на інтерактивній карті дозволяє оперативно визначити місцезнаходження, траєкторію руху та інші параметри літальних апаратів. Це сприяє швидкому прийняттю рішень на оперативному рівні.
4. Виклики та обмеження – одним з основних викликів для акустичних систем є шумові завади. Навколишнє середовище, такі як вітер, трафік або інші джерела звуку, можуть впливати на ефективність системи. Тому важливо розробляти алгоритми, які можуть відрізнити корисний сигнал від шуму.
5. Інтеграція з іншими системами – для підвищення ефективності системи виявлення можлива її інтеграція з радіолокаційними, оптичними та іншими системами спостереження. Такий комплексний підхід може забезпечити більш повне та точне відображення повітряної обстановки.

2.2. Аналіз існуючих рішень

Для вирішення виявленої проблеми, в Національному університеті «Львівська політехніка» розробляється розподілена система виявлення та супроводження літальних апаратів, яка складається з множини акустичних сенсорів та сервера [3]. Сенсори призначені для виявлення цілей за аналізом акустичних сигналів, що генеруються їхніми двигунами та вимірювання азимуту та кута місця цілей. Сервер забезпечує агрегацію результатів вимірювання сенсорів, представлення в режимі реального часу на карті оперативної обстановки та доступ до неї уповноважених користувачів. Результати вимірювання передаються між сенсорами та сервером з допомогою безпроводних каналів зв'язку.

Норвезькою компанією Squarehead Technology було створено акустичний сенсор для виявлення БПЛА – Discovair G2. З публічної інформації відомо, що Discovair G2 використовує запатентовані масиви мікрофонів. Завдяки 128 взаємопов'язаним мікрофонним елементам сенсорні блоки Discovair здатні встановлювати азимут і висоту цілі в режимі

реального часу за допомогою вдосконаленої цифрової обробки сигналу [4].

III. РОЗРОБКА ТА ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1. Опис програмного забезпечення

Для реалізації розробленого програмного забезпечення було використано сучасний стек технологій, зокрема Javascript бібліотеку React в комбінації з фреймворком Next.js.

Для обробки та відображення геоданих у веб-додатку було використано бібліотеку Mapbox GL. Mapbox GL надає гнучкі інструменти для інтеграції інтерактивних карт у вебзастосунки, дозволяючи користувачам взаємодіяти з географічною інформацією в реальному часі.

Бібліотека Turf.js, яка також була інтегрована у проект, дозволяє виконувати розширений аналіз геоданих на стороні клієнта. З її допомогою можна обчислювати різноманітні геометричні операції, такі як об'єднання, перетин або вирахування площі об'єктів.

Для оптимізації відображення великої кількості точок на карті було використано бібліотеку Supercluster. Ця бібліотека дозволяє групувати точки на карті в кластери, що спрощує візуалізацію даних та покращує продуктивність веб-додатку при роботі з великими наборами даних.

На рис. 1 зображено інтерфейс головної сторінки, де розміщена карта та корисні віджети.

В лівій частині розміщена навігація та інформація по статусу сенсорів та їх модулів, погодних умов, швидкості та напрямку вітру

В правій частині розміщена інтерактивна карта з можливістю зміни відображення сенсорів та шляху цілей. Сенсори відображаються за принципом кластеризації і при зміні масштабу проводиться обрахунок і відображається або сенсор або кластер з кількістю сенсорів у ньому.

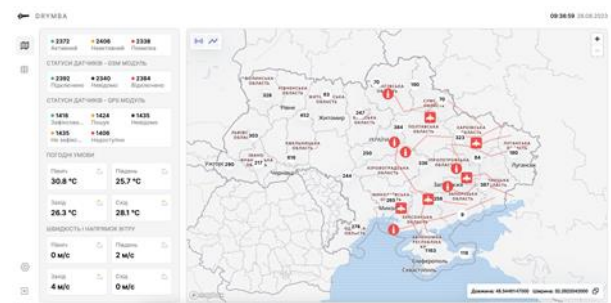


Рисунок 1. Інтерфейс інтерактивної карти

3.2. Тестування програмного забезпечення

Програмне забезпечення було піддано ретельному тестуванню з метою перевірки його продуктивності та стабільності при великих обсягах даних. Основна увага була приділена перевірці роботи системи при великій кількості сенсорів та цілей. Конкретно, були створені тестові сценарії для ситуацій, де кількість сенсорів варіювалася від 1000 до 10000, а кількість цілей – від 10 до 100. Це допомогло оцінити здатність програмного

забезпечення ефективно обробляти великі датасети, а також його відповідність функціональним вимогам та вимогам до інтерфейсу користувача.

3.3. Результати тестування

Програмне забезпечення продемонструвало високу ефективність відображення даних від сенсорів на інтерактивній карті. Користувачам надано зручний інтерфейс для взаємодії з даними та отримання актуальної інформації щодо повітряних цілей.

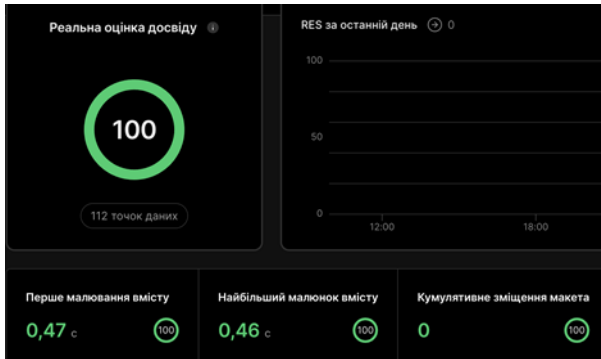


Рисунок 2. Аналітика швидкості роботи ПЗ

IV. ВИСНОВКИ

Сучасні системи виявлення літальних апаратів стикаються з численними викликами, які вимагають комплексного підходу до їх розробки та впровадження. Інтеграція різних технологій та методів спостереження виявляється ключовим фактором успіху в цій області.

Використання сучасних технологій, таких як React та Next.js, забезпечує гнучкість системи, її адаптивність до змінних умов та можливість швидкої модифікації. Ці технології також сприяють створенню інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів для користувачів, що є важливим для ефективної взаємодії з системою.

Акустичне виявлення літальних апаратів стає все більш актуальним у контексті зростання їх використання в різних сферах.

Загалом, розвиток та вдосконалення систем виявлення літальних апаратів є актуальним завданням, яке вимагає поєднання наукових досліджень, інноваційних технологій та практичного досвіду для забезпечення ефективності та надійності таких систем.

Майбутні дослідження та розробки будуть спрямовані на:

1. Вдосконалення алгоритмів обробки даних, зокрема, для виявлення слабощумних або далеких об'єктів.
2. Розробку нових модулів для аналізу акустичних сигналів, які можуть виявляти специфічні особливості різних типів двигунів.
3. Проведення більш детальних тестувань системи в реальних умовах, зокрема, в умовах погіршеної видимості або високого рівня шуму.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Климченко В. Й., Дончак Д. А., Донченко М. М., Тютюнюк В. О. Проблеми набуття спроможностей радіотехнічних військ з розвідки перспективних засобів повітряного нападу. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2021. Вип. 3(44). С. 108–115.
- [2] Айтїшники, які нині служать у ЗСУ, створили систему «Звук» для виявлення російських дронів і ракет. Як це працює. [Online]. URL: <https://dev.ua/news/antydron-1674209666>. (Accessed: October 16, 2023).
- [3] Р. В. Кочан, Н. С. Гоц, Л. Д. Озірковський та ін. Концепція акустичної системи виявлення дронів. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ* : тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 17–18 травня 2023 р.). Львів : НАСВ, 2023. С. 77–78.
- [4] SquareHead Discovair G2 – Siphon. [Online]. URL: <https://www.siphon.no/squarehead-discovair-g2/>. (Accessed: October 16, 2023).

Використання інформаційних дашбордів у розумних містах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.058>

Олег Палка

Кафедра комп'ютерних наук
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя
м. Тернопіль, Україна
poleg1997@gmail.com

Леся Дмитроца

Кафедра комп'ютерних наук
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя
м. Тернопіль, Україна
dmytrotsa.lesya@gmail.com

Анотація—Обґрунтована доцільність та наведено приклади використання інформаційних дашбордів у розумних містах. Попри швидке поширення та розвиток елементів розумності із використанням IoT, впроваджуються різноманітні архітектури та платформи розумних міст. Інформаційні дашборди є своєрідним відображенням ключових показників (КРІ) міста, що допомагає ефективно визначити сильні та слабкі сторони як для жителів міста так і для місцевої влади.

Ключові слова—розумне місто; інформаційний дашборд; візуалізація; графіки; дані.

I. ВСТУП

Розумні міста зосереджені на реалізації сталих, ефективних та результативних державних і приватних послуг та інфраструктури в міському просторі [1]. Протягом останніх двох-трьох десятиліть технології, проекти та ініціативи, пов'язані з "розумними" містами, стрімко розвивалися, впливаючи майже на всі аспекти міського життя. Однак залишається багато проблем і бар'єрів у моніторингу та оцінці ефективності «розумних» міст, які включають зв'язок і аналіз міської інформації з географічним розташуванням, обробку великих геопросторових даних і виявлення просторових даними та виявлення просторово-часових закономірностей у міському просторі [2].

Зростаюча потреба в «розумних» і підключених громадах/містах надихнула багато досліджень в цій галузі, що в подальшому призводить до появи великої кількості даних, які надходять з різних джерел, таких як стаціонарні датчики, мобільні пристрої, онлайн-дані, соціальні дані. Ця велика кількість даних надходить з «цілого ряду областей застосування, включаючи, але не обмежуючись ними: сільське господарство, цивільна інфраструктура, пом'якшення наслідків катастроф і реагування на них, освіта і навчання, енергетика, якість навколишнього середовища, здоров'я і благополуччя, включаючи охорону здоров'я, соціальні послуги, стійкість, безпеку, соціальні послуги, телекомунікації, транспорт і мобільність, міське і сільське планування і водні ресурси [3]». Хоча розуміння, аналіз, обробка даних є важливими, візуалізація даних у режимі реального часу також є надзвичайно корисною для осіб, які приймають

рішення, міських операторів, мешканців тощо. Це підкреслило нагальну потребу у створенні графічного інтерфейсу користувача для відображення даних у змістовний спосіб [4]. Можемо називаємо такий інтерфейс «інформаційною панеллю розумного міста».

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Країни по всьому світу переживають стрімку урбанізацію, що створює величезний тиск на урядовців, забудовників та бізнес. Крім того, міське населення зростає безпрецедентними, тривожними темпами, тому необхідно управляти ним раціонально та ефективно. Інноваційні технології у вигляді рішень для розумного міста – найкращий спосіб впоратися з такою ситуацією. Ці рішення розширюють можливості державних підприємств за допомогою геопросторових і муніципальних інформаційних панелей та будівельних компаній для підвищення ефективності послуг, створення безпечніших районів, скорочення викидів вуглецю, збереження довкілля та підвищення загального рівня життя громадян (Dameri, 2017) [5]. Однак управління даними та прийняття рішень є складним завданням для адміністрації. Наявність рішення бізнес-аналітики для подолання таких труднощів є дуже важливо мати рішення для бізнес-аналітики, щоб впоратися з такими труднощами. Дашборди ідеально підходять для вирішення цієї проблеми. На рисунку нижче (рис. 1) представлено модель інформаційного дашборду розумних міст Ліона, Мюнхена та Відня (Morishita-Steffen et al., 2021).

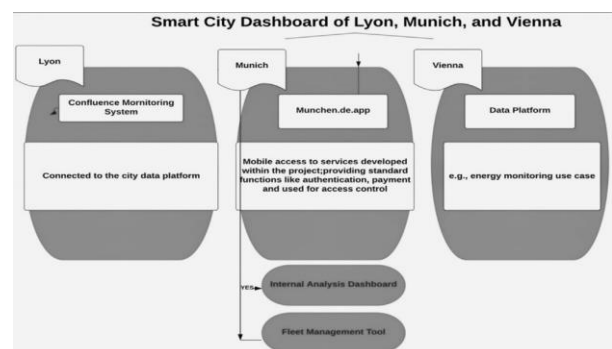


Рисунок 1. Модель інформаційного дашборду розумного міста Ліона, Мюнхена та Відня [5]

Візуальні аналітичні панелі, що використовують динамічні зображення, можуть розкрити Data City. Міські системи та інфраструктура, а також суспільство, економіка, навколишнє середовище та населення міста можуть бути використані для його характеристики. Коли з'являються нові дані, ці графіки слугують основою для відображення, яке можна оновлювати або змінювати. Наприклад, можна вибирати різноманітні формати візуалізації даних, фільтрувати, запитувати, збільшувати/зменшувати, планувати, накладати або візуалізувати їх одночасно кількома способами (див. рис. 1). За певних обставин можна консолідувати та впорядкувати життєво важливі дані на одному екрані, щоб забезпечити огляд інформації (Few, 2006, с. 34), дашборди пропонують основну інформацію в одному вікні, подібно до автомобільних та авіаційних дашбордів (Dubriwny & Rivards, 2004; Gray, O'Brien, & Hugel, 2016) [5]. Користувачі можуть отримати доступ до безлічі взаємопов'язаних інформаційних дашбордів в рамках однієї системи і проводити узагальнюючі та детальні дослідження для використання аналітичних дашбордів. Ієрархічна структура полегшує навігацію та детальний аналіз. Використання дашбордів зростає в меріях, громадських будівлях та на спеціалізованих вебсайтах.

III. ОГЛЯД РЕАЛІЗОВНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДАШБОРДІВ У РОЗУМНИХ МІСТАХ

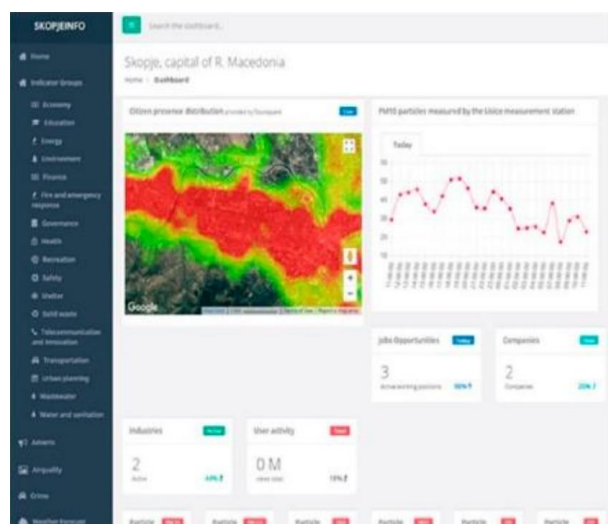
Серед інформаційних дашбордів у розумних містах варто відзначити інформаційний дашборд London City, Бандунгський інформаційний дашборд та інформаційний дашборд штату Айова. Модель з деталізацією призначена для більш ретельного відображення деталей. Шаблон «рядок-стовпець» відображає індикатори у вигляді рядків і стовпців в єдиній матриці, тоді як шаблон «меню» розділяє макет на дві частини: область меню і простір індикаторів. Стиль фільтра дозволяє фільтрувати дані та інформацію для розширеного аналізу [6]. Вигляд дашборду London City, розробленого з використанням односторінкового стилю та шаблону «рядок-стовпець», дашборду Скоп'є, що містить деталізацію за допомогою меню, та дашборду Дубліна, що базується на стилі деталізації за допомогою меню, наведено на рис. 2.

Міський дашборд для міст Великої Британії показує погодні, екологічні, транспортні та енергетичні показники в основному на одному екрані вебсайту, з числовими значеннями в кольорових блоках для зручності перегляду.

Запропонована інформаційна панель громадянина Едмонтон є частиною міського проекту відкритих даних. Дашборд інтегрує дані з різних офіційних джерел і спрощує ключові показники ефективності (KPI), дизайн взаємодії та критерії відбору інформації. Вона структурована за шістьма міськими послугами: транспорт, зручність для життя, навколишнє середовище, міська форма, економіка та фінанси [6].



a)



б)



в)

Рисунок 2. Вигляд деяких прикладів дашбордів: а) дашборд London City, одна сторінка з рядками; б) дашборд Скоп'є, деталізація за допомогою меню; в) дашборд Дубліна, деталізація за допомогою меню

IBM Intelligent Operations Center for Smart Cities (IOS) запропонував платформу, орієнтовану на міських менеджерів, Operations Center for Smart Cities (IOS) [6] запропонував платформу, орієнтовану на міських менеджерів, і як такий, він

має на меті бути комплексним інструментом, що дозволяє використовувати різні рівні та інструменти для аналізу даних, а також інтегрувати їх з міськими операціями. Як правило, міські дашборди використовуються в двох різних прикладних моделях для відстеження ефективності розумного міста – платформи дашбордів на рівні міста, які надають цілісне уявлення про ефективність міста, та аналітичні дашборди, які підходять для вимірювання та аналізу певних аспектів ефективності міста, таких як енергетика, громадський транспорт, соціальна сфера тощо.

IV. ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інформаційний дашборд у розумному місті можна розглядати як інструмент, який має відображати узагальнену інформацію про місто в єдиному вигляді, щоб допомогти громадянам відстежувати та аналізувати те, що відбувається з ним. Вся ця інформація не тільки дає загальну картину поточного стану всіх систем, з яких складається місто, але й дозволяє аналізувати та виявляти тенденції та поведінку, які повторюються з часом, що дозволяє прогнозувати майбутні інциденти та формувати рішення ще до того, як вони виникнуть.

Використання інформаційного дашборду у розумному місті надзвичайно корисне для державного управління, коли мова йде про управління містом, оскільки це забезпечує перегляд усіх даних, які він збирає з різних джерел, і робить

процес прийняття рішень набагато більш освіченим, що буде конвертовано в набагато більш позитивні результати для мешканців.

У майбутніх дослідженнях планується розробити інформаційний дашборд для тестування та оцінки результатів українських міст за рямом вже реалізованих/впроваджених елементів розумності.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] R. P. Dameri. Urban Smart Dashboard. Measuring Smart City Performance. *Smart City Implementation*. Springer : Cham, 2017. Pp. 67–84.
- [2] C. Jing, M. Du, S. Li, and S. Liu. Geospatial Dashboards for Monitoring Smart City Performance. *In Sustainability*. 2019. Vol. 11(20). 5648. URL: <https://doi.org/10.3390/su11205648>.
- [3] Smart and Connected Communities (S&CC), NSF program solicitation, NSF 19-564. [Online]. URL: <https://www.nsf.gov/pubs/2019/nsf19564/nsf19564.htm>. (Accessed: May 22, 2020).
- [4] Q. Han, P. Nesi, G. Pantaleo, and I. Paoli. Smart City Dashboards: Design, Development, and Evaluation. *2020 IEEE International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS)*. Rome, Italy, 2020. Pp. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/ICHMS49158.2020.9209493>.
- [5] M. A. Islam, and M. A. Sufian. Employing AI and ML for Data Analytics on Key Indicators: Enhancing Smart City Urban Services and Dashboard-Driven Leadership and Decision-Making, *Technology and Talent Strategies for Sustainable Smart Cities*. Bingley : Emerald Publishing Limited, 2023. Pp. 275–325. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.03081>.
- [6] M. Farmanbar, and Ch. Rong. Triangulum City Dashboard: An Interactive Data Analytic Platform for Visualizing Smart City Performance. *Processes*. 2020. Vol. 8(250). Pp. 1–22. URL: <https://doi.org/10.3390/pr8020250>.

Система підтримки прийняття рішень для верифікації якості коду прикладного програмного забезпечення

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.059>

Владислав Паращенко
Кафедра комп'ютерних наук
Сумський державний університет
м. Суми, Україна

Олег Берест
Кафедра комп'ютерних наук
Сумський державний університету
м. Суми, Україна

Анотація—запропонована архітектура системи підтримки прийняття рішень для контролю якості програмного коду прикладних кодових баз. Запропонований підхід є модульним та придатним до застосування в більшості проектів по розробці програмного забезпечення. Запропонована система дозволяє вивести емпіричні правила для довгострокової розробки та підтримки програмного забезпечення.

Ключові слова—якість програмного коду; система підтримки прийняття рішень; метрики коду.

I. ВСТУП

Складність підтримки програмного забезпечення полягає в неможливості охоплення значних об'ємів даних в полі уваги однієї людини. Але електронні обчислювальні машини не мають подібної проблеми, величезні об'єми оперативної пам'яті дозволяють їм зберігати та оперувати станом надзвичайно складних систем. Недоліком комп'ютерів є те що вони можуть працювати лише за наперед заданим алгоритмом, який надзвичайно складно реалізувати для системи, яка має необмежену кількість станів. В просторі вирішення подібних проблем з'явилось машинне навчання, яке покликане вивести правила прийняття рішення з попереднього досвіду, в якому вже містяться необхідні дані. Цей підхід полегшує реалізацію, проте програє в точності перед системами, які мають задану систему правил.

Критерій підтримуваності є одним з характеристик якості програмного забезпечення згідно з ISO25010:2011[1]. Довгострокова розробка вимагає значних людських та часових ресурсів. Часто при передачі відповідальності від одного розробника до іншого втрачаються знання, які необхідні в процесі розробки. Тож ці знання треба зберігати у вигляді документації, яку необхідно вчасно оновлювати. Недоліком документації є її швидка втрата актуальності та невідповідність реалізації. Найбільш якісним методом буде автоматизована генерація документації з програмного коду, але й такий підхід має недоліки в зв'язку з обмеженістю та недосконалістю наявного інструментарію. З цього випливає, що побудова системи, яка мала б всі дані про кодову базу та могла б виводити правила та критерії підтримки є необхідністю сьогодення.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Рішення, яке могло б верифікувати показники підтримуваності все ще не існує. Якість розроблених систем майже повністю залежить від розробників. Для автоматизації знаходження розповсюджених проблем та вразливостей застосовують статичний аналіз програмного коду. Такі інструменти як SonarCube, PVS Studio чи DeepSource найбільш популярні в цій галузі. Програмні комплекси для статичного аналізу мають фіксований набір правил, який дозволяє запобігти поширеним помилкам. Також такі утиліти як правило звичайно мають інтерфейс розширення для додавання власних правил. Проте вагомою проблемою таких інструментів є обмеженість критеріїв, які можна застосувати. Кожне правило повинно бути розроблене та додане до проекту, подібні системи не виявляють емпіричні закономірності побудови кодових баз, що було б надзвичайно корисно в задачах довгострокової підтримки.

Рішенням зазначених проблем може стати система підтримки прийняття рішень для контролю якості програмного забезпечення, що має мати достатню зібраної інформації для її нормального функціонування. Найбільш якісним джерелом буде сам програмний код, який на відміну від будь яких схем, діаграм чи документації, завжди буде актуальним. Як критерії якості можуть бути застосовані загально відомі метрики оцінювання програмного коду LCOM [2], CBO [3], NOC [4], WMC [5]. Вони дозволяють отримати числове представлення коду, яке визначає відповідність реалізації принципам SOLID [6]. Більшість популярних мов програмування, наприклад Java чи Python, містять готові рішення, які дозволяють визначити значення подібних метрик. Іншим підходом може бути створення власної реалізації, використовуючи абстрактне синтаксичне дерево (AST) в якості джерела даних. Наступним кроком буде навчання системи підтримки прийняття рішень. В якості моделі може бути використане класичне дерево рішень.

Альтернативні моделі нейромереж чи більш складних агрегаційних моделей по типу лісу випадкових дерев не дозволяють однозначно визначити та візуалізувати шлях прийняття рішення,

що є ефективним для трактування отриманих порад при застосуванні системи. Обчислювальна складність алгоритму дозволяє навчати СППР її з використанням лише центрального процесора, без застосування графічних прискорювачів, що значно полегшує вимоги до апаратного забезпечення кінцевих користувачів. Можлива функціональна схема системи зображена на Рисунок 1.

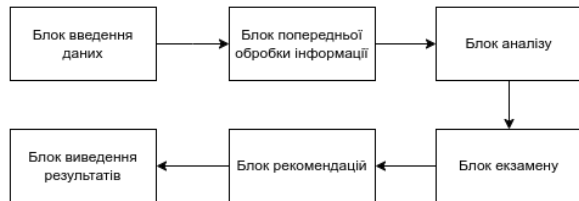


Рисунок 1. Функціональна схема системи

Починати збір даних для навчання необхідно зі стартом розробки, щоб використовувати кожен новий програмний внесок (коміт) в якості елемента навчальної вибірки. Завдяки такому підходу не треба витрачати час розробників для ручної розмітки даних. Можна почати використовувати і

заздалегідь навчену модель на попередньо відібраних репозиторіях відкритого програмного забезпечення. Навчена модель може відразу почати використовуватися в існуючих проектах, проте вона не буде знати про особливості конкретних реалізацій, тож буде програвати в якості перед моделлю, яка донавчається в процесі розробки.

III. ВИСНОВКИ

Запропонована архітектура дозволяє побудувати систему підтримки прийняття рішень верифікації якості програмного забезпечення, яку можна експлуатувати в ході дострокової підтримки. Така система може виявляти правила та закономірності побудови, що не будуть задокументовані та зрозумілі розробникам, які не мають достатнього досвіду з конкретним проектом. Завдяки модульності рішення таку систему можна адаптувати для майже будь-якої мови програмування. Обчислювальні вимоги запропонованого методу досить незначні, що дозволяє інтегрувати запропоновану систему до будь-якого процесу розробки програмного забезпечення.

Формування колірних моделей з центруванням інтервалів різниць компонентів в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.060>

Олександр Шпортко

Кафедра інформаційних систем та обчислювальних
методів

ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний
університет імені академіка Степана Дем'янука»
м. Рівне, Україна

ITShportko@gmail.com

Андрій Бомба

Кафедра комп'ютерних наук та прикладної
математики

Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна

abomba@ukr.net

Анотація—Обґрунтована доцільність та описаний механізм формування різницевої колірної моделі з центруванням інтервалів різниць компонентів під час прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат. На прикладі зображень тестового набору АСТ показано, що застосування різницевої колірної моделі з центруванням інтервалів різниць компонентів дає змогу зменшити коефіцієнти стиснення зображень в середньому на 0.02 bpb.

Ключові слова—прогресуюче стиснення зображень, стиснення без втрат, різницева колірні моделі з цілими коефіцієнтами.

I. ВСТУП

Як відомо, зображення суттєво полегшують і прискорюють сприйняття інформації людиною. Саме тому на сьогодні вони є невід'ємною складовою мультимедійної інформації, яка найчастіше передається каналами зв'язку чи зберігається на електромагнітних носіях [1].

Всі графічні формати та методи, що в них використовуються, за принципом стиснення даних зображень поділяють на два основні класи: з втратами (наприклад, JPEG) та без втрат (наприклад, PNG) [2]. І якщо для переважної більшості алгоритмів компресії зображень з втратами можна забезпечити потрібний коефіцієнт стиснення (відношення розмірів стиснутого до нестиснутого файлів зображення, виражене в bpb, надалі – КС) за рахунок погіршення якості, то рівень стиснення зображень без втрат залежить, власне, лише від перепадів кольорів їх пікселів та самого алгоритму стиснення, не регулюється програмно і становить в середньому тільки 30-70 % [1]. Отже, проблема підвищення ефективності стиснення зображень є актуальною сьогодні і буде актуальною в найближчому майбутньому.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Будь-яке стиснення даних можливе за рахунок зменшення чи ліквідації надлишковостей [3]. В зображеннях розрізняють три основні типи надлишковостей [4]: візуальну (полягає в наявності інформації, яка не сприймаються зоровою системою людини), міжелементну або просторову (проявляється в корельованості яскравостей суміжних пікселів) та кодову (виявляється при використанні кодів однакової довжини для елементів з різними ймовірностями). Зрозуміло, що чим більше видів надлишковостей кожного типу опрацьовуються графічним форматом – тим ефективніше стиснення. Але в процесі стиснення без втрат інформація не втрачається, ось чому перший тип надлишковостей не зменшується. Тому стиснення зображень без втрат в архіваторах та графічних форматах найчастіше відбувається максимум в чотири етапи: на першому контекстно-залежне кодування зменшує надлишковості між однаковими фрагментами чи фрагментами з однаковою структурою (зменшує міжелементну надлишковість); на другому етапі виконується перехід до альтернативної колірної моделі [5; 6]; на третьому – яскравості компонентів пікселів перетворюються за допомогою предикторів [7] (другий та третій етапи не стискають зображення, але збільшують нерівномірність розподілу яскравостей і тому підвищують ефективність четвертого етапу); на четвертому етапі контекстно-незалежне кодування формує коди елементів з довжинами, залежними від їх ймовірностей (опрацьовує кодову надлишковість, наприклад, кодами Хафмана чи арифметичними кодами [2; 3; 5–7]). Середня довжина коду елемента блоку після застосування будь-якого контекстно-незалежного алгоритму, згідно з формулою of Shannon [4], не може бути меншою ентропії джерела

$$H = -\sum_i p_i \times \log p_i, \quad (1)$$

де p_i – ймовірність появи елемента i .

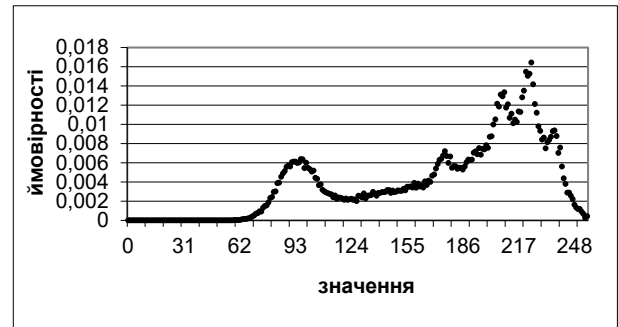
Як відомо, ентропія джерела зменшується зі збільшенням нерівномірності розподілу ймовірностей (частот) між елементами [7]. Оскільки середня довжина контекстно-незалежного коду близька до ентропії (1) [3], то загальна довжина блоку таких кодів для послідовності елементів наближено дорівнює сумі довжин їх ентропійних кодів, тобто довжині ентропійного коду послідовності [6]. Нехай кожне зі значень i зустрічається n_i разів в послідовності довжини $N = \sum_i n_i$. Згідно статистичного означення ймовірності, $p_i = n_i / N$, тому довжина ентропійного коду елемента, до якого близька довжина арифметичного коду, становить $l_i = -\log p_i = \log \frac{N}{n_i}$, а загальна довжина ентропійного коду послідовності, враховуючи (1), наближається до значення

$$L = N \times H = N \log(N) - \sum_i n_i \log(n_i). \quad (2)$$

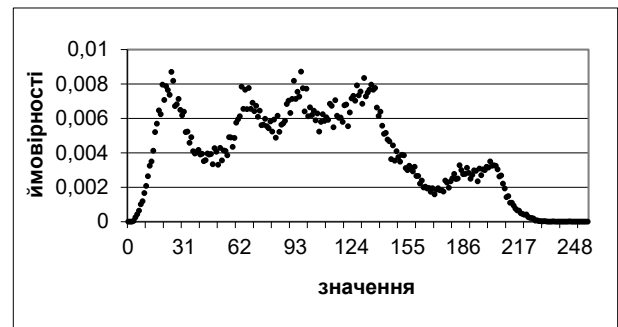
III. ФОРМУВАННЯ КОЛІРНИХ МОДЕЛЕЙ З ЦЕНТРУВАННЯМ ІНТЕРВАЛІВ РІЗНИЦЬ КОМПОНЕНТІВ

Як було показано в [6], різницеві колірні моделі неефективні для фрагментів з коливаннями близьких значень яскравостей вхідних компонентів: якщо значення яскравостей від'ємника несуттєво перевищують значення яскравостей зменшуваного, то в різницях при 8-бітній розрядності дискретизації отримуємо значення, близькі до 255. А коли значення яскравостей від'ємника трохи менші значень яскравостей зменшуваного, то в різницях отримуються значення, близькі до нуля (рис. 1в). Таке розсіювання значень різниць колірної моделі для близьких пікселів негативно впливає на точність прогнозування нелінійними предикторами і, як наслідок, збільшує ентропію (1). Для уникнення такого розсіювання значень різниць близьких яскравостей компонентів в [6] ми зміщували до 128 (середини діапазону можливих значень) різниці медіан компонентів колірної моделі RGB, розраховуючи на те, що більшість яскравостей цих компонентів зосереджені навколо їх медіан. Але зміщення до середини діапазону різниці медіан переміщує до значень, близьких до нуля і 255 значення, віддалені від різниці медіан на 128 і погіршує прогнозування навколо них. Наприклад, медіана компоненти R зображення *Lena.bmp* (рис. 1а) для пікселів, неопрацьованих контекстно-незалежним алгоритмом, становить 197. Медіана компоненти G (рис. 1б) цих же пікселів рівна 98. Тому для зміщення різниці медіан компоненти $R-G$ до 128 різниці яскравостей цих компонентів для кожного пікселя потрібно збільшувати на $-197 + 98 + 128 = 29$. Застосування різниці $R - G + 29$ (рис. 1г) погіршує прогнозування навколо різниць компонентів, рівних 227 ($197 - 98 + 128$), адже переведе їх в значення, близькі до нуля там, де $R - G \geq 227$, і в значення, близькі до 255 там, де $R - G < 227$. Тому для розсіювання якомога меншої кількості різниць зміщувати різниці компонентів

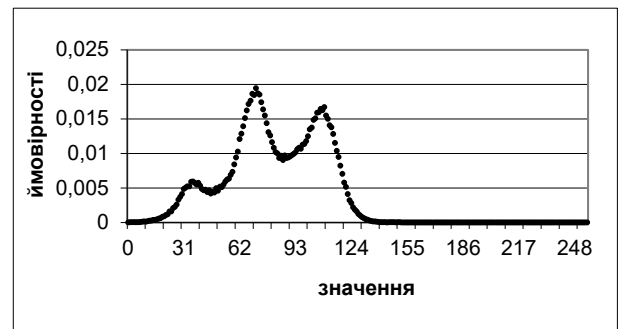
будемо так, щоб навколо нуля та 255 було зосереджено якомога менше значень. Або, що те саме, до середини діапазону можливих значень будемо зміщувати середину інтервалу, що охоплює майже весь діапазон можливих значень, з максимальною кількістю елементів.



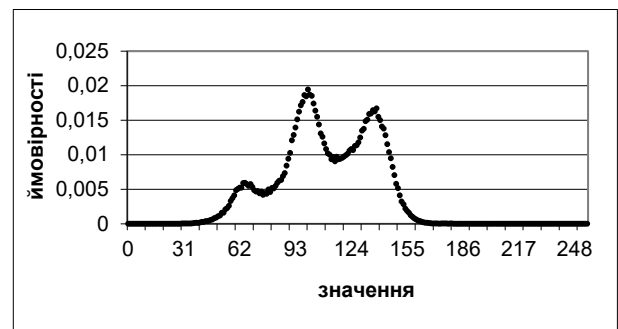
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1. Розподіл ймовірностей (відносних частот) яскравостей окремих компонентів та їх різниць, не опрацьованих контекстно-залежним алгоритмом, для зображення *Lena.bmp*: а) компоненти R ; б) компоненти G ; в) різниці $R - G$; г) зміщеної різниці $R - G + 29$

Для 8-ми бітної розрядності дискретизації ми реалізували зміщення до 128 середини інтервалу з максимальною кількістю елементів з розмахом 241 (по 120 значень зліва і справа від цієї середини). Тим

самим, інтервал решти діапазону можливих значень з розмахом 15 та найменшою кількістю елементів ми розміщуємо навколо нуля. Наприклад, для пікселів зображення Lena.bmp, неопрацьованих контекстно-залежним алгоритмом, максимальна кількість елементів різниці компонентів $R - G$ зосереджена в інтервалі $[-83; 157]$, тобто в сукупності інтервалів $[173; 255]$ і $[0; 157]$. Відповідно, в інтервалі $[158; 172]$ зосереджено найменше елементів серед інтервалів з розмахом 15. Тому для різниці $R - G$ середину інтервалу з максимальною кількістю елементів 37 слід змістити до середини діапазону можливих значень 128, додавши до всіх таких різниць 91 (128-37). Це змістить інтервал $[158; 172]$ з найменшою кількістю елементів в окіл нуля (рис. 2) і тим самим підвищить ефективність застосування предикторів та зменшить ентропію (1). Наголосимо: центрувати інтервали з максимальною кількістю елементів потрібно лише для різниць компонентів, адже зміщення вхідних компонентів не покращує результати застосування предикторів. Надалі інтервали з максимальною кількістю елементів різниць компонентів будемо називати скорочено «Інтервали різниць компонентів», маючи на увазі, що у цих інтервалах зосереджена максимальна кількість значень таких різниць.

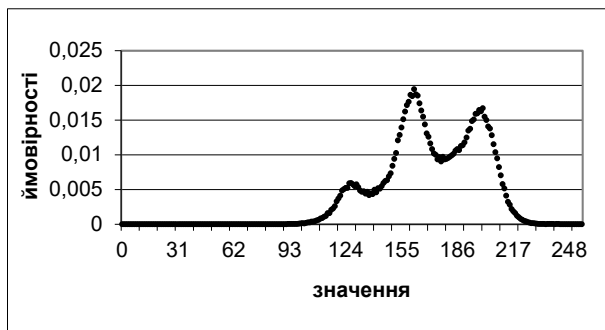


Рисунок 2. Розподіл ймовірностей (відносних частот) яскравостей зміщеної різниці $R - G + 91$ для пікселів зображення Lena.bmp, не опрацьованих контекстно-залежним алгоритмом

Після застосування предикторів довжина ентропійного коду різниці компонентів близька до довжини ентропійного коду протилежної різниці, адже вона базується не на значеннях елементів, а на їх частотах (2). Це підтверджують і дані табл. 1. Довжина ентропійного коду після застосування різницевої колірної моделі з протилежними різницями та предикторів може незначно зменшитися насамперед за рахунок збільшення перехресної кореляції між компонентами. Тому для прискорення вибору різницевої колірної моделі з центруванням інтервалів різниць компонентів виділимо з 49 альтернативних моделей [6] 16 основних:

0. R, G, B ;
1. $R, R-G-middle(R-G)+128, R-B-middle(R-B)+128$;
2. $R, R-G-middle(R-G)+128, B-G-middle(B-G)+128$;
3. $R, G-B-middle(G-B)+128, R-B-middle(R-B)+128$;
4. $G-R-middle(G-R)+128, G, G-B-middle(G-B)+128$;
5. $G-R-middle(G-R)+128, G, B-R-middle(B-R)+128$;
6. $R-B-middle(R-B)+128, G, G-B-middle(G-B)+128$;
7. $B-R-middle(B-R)+128, G-R-middle(G-R)+128, B$;

8. $R-G-middle(G-R)+128, B-G-middle(B-G)+128, B$;
9. $B-R-middle(B-R)+128; B-G-middle(B-G)+128, B$;
10. $R, G, G-B-middle(G-B)+128$;
11. $R, G, R-B-middle(R-B)+128$;
12. $R, R-G-middle(R-G)+128, B$;
13. $R, B-G-middle(B-G)+128, B$;
14. $G-R-middle(G-R)+128, G, B$;
15. $B-R-middle(B-R)+128, G, B$.

Цей перелік моделей подібний до переліку, наведеного в [6], але додатково ще й передбачає центрування інтервалів з максимальною кількістю елементів (центр кожного такого інтервалу обчислює функція $middle()$). Компоненти різниць колірних моделей містять однакові зменшувані чи від'ємники одного знаку, що підвищує їх перехресну кореляцію.

Обирати альтернативну різницеву колірну модель доцільно в два етапи: на першому – вибрати таку різницеву колірну модель з 16 основних альтернативних, наведених вище, яка забезпечує найменшу прогнозовану довжину ентропійного коду (2) після застосування предикторів, а на другому – співставити ефективність обраної моделі з максимум трьома альтернативними різницевою колірними моделями з протилежними різницями (з двома протилежними різницями, з першою протилежною різницею та з другою протилежною різницею). Наприклад, якщо після першого етапу найменшу прогнозовану довжину ентропійного коду забезпечує різницева колірна модель $G - R, G, G - B$, то на другому етапі потрібно буде порівняти її ефективність лише з такими альтернативними різницевою колірними моделями: $R - G, G, B - G; R - G, G, G - B; G - R, G, B - G$. Такий підхід зменшує кількість аналізованих альтернативних колірних моделей з 49 до максимум 19 і тому прискорює в 2.5 рази вибір альтернативної колірної моделі, спрощує реалізацію кодера та забезпечує можливість компактного зберігання номера обраної з 16 основних альтернативних різницевої колірних моделей (для цього достатньо 4 біти). Причому це стосується як цілого зображення, так і його окремих фрагментів.

IV. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИЦЕВИХ КОЛІРНИХ МОДЕЛЕЙ З ЦЕНТРУВАННЯМ ІНТЕРВАЛІВ РІЗНИЦЬ КОМПОНЕНТІВ

Проаналізуємо результати застосування сформованих різницевої колірних моделей з цілими коефіцієнтами з центруванням інтервалів різниць компонентів для стиснення тестових зображень набору АСТ [8] та порівняємо їх з аналогічними результатами застосування колірних моделей з медіанами компонентів. Співставляючи дані першого та другого рядків табл. 1 бачимо, що зміщення середин інтервалів різниць компонентів до середини діапазону можливих значень замість зміщення до цього ж значення різниць медіан компонентів зменшило КС в середньому на 0.02 bpb. При цьому зменшення КС спостерігається для трьох з п'яти фотореалістичних знімків, максимальне зменшення становить 0.11 bpb (для зображення № 8). На стиснення дискретно-тонових зображень різницевої колірні моделі істотно не впливають.

Середній час кодування (табл. 2) відносно 49-ти альтернативних кольірних моделей з [6] збільшився на 3.81%, оскільки зміщення середин інтервалів необхідно розраховувати для 6-ти різниць компонентів, а медіани – лише для трьох компонентів. Час декодування стиснутих зображень внаслідок застосування різницевої кольірних моделей з цілими коефіцієнтами з центруванням інтервалів різниць компонентів не змінився і становить в середньому 0.59 с, оскільки зміщення різниць передаються декодеру явно як в першому, так і в другому випадках.

TABLE I. Коефіцієнти стиснення зображень набору АСТ ПІСЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ФОРМУВАННЯ РІЗНИЦЕВИХ КОЛІРНИХ МОДЕЛЕЙ, ВРВ

Колірна модель	№ файла								Серед. КС
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Різницева з 49-ти альтернативних з медіанами компонентів	1.34	0.57	4.45	3.25	3.69	4.06	0.59	3.71	2.71
Різницева з 49-ти чи 19-ти альтернативних з центруванням інтервалів	1.34	0.57	4.45	3.25	3.67	4.05	0.59	3.60	2.69
Різницева з 16-ти основних альтернативних з центруванням інтервалів	1.34	0.57	4.45	3.27	3.67	4.05	0.59	3.60	2.69

TABLE II. Час кодування файлів зображень набору АСТ з ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ФОРМУВАННЯ РІЗНИЦЕВИХ КОЛІРНИХ МОДЕЛЕЙ, С

Колірна модель	№ файла								Серед. час
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Різницева з 49-ти альтернативних з медіанами компонентів	2.62	3.53	1.29	2.17	1.41	2.20	1.50	2.05	2.10
Різницева з 49-ти, 16-ти чи 19-ти основних альтернативної з центруванням інтервалів	2.45	3.52	1.41	2.33	1.56	2.41	1.61	2.14	2.18

Вибір різницевої кольірних моделей тільки з 16-ти наведених основних альтернативних погіршив КС лише для зображення № 4 на 0.02 брв (третій рядок табл. 1), відчутно не вплинувши на час кодування та декодування. Такий вибір дає змогу істотно спростити процес кодування та використовувати для зберігання різницевої кольірної моделі лише 4 біти. Бачимо, що для цілих зображень після вибору різницевої кольірної моделі з 16-ти основних альтернативних доцільно ще й проаналізувати показники стиснення максимум трьох моделей з симетричними різницями. Це дає змогу отримати такі ж КС, як і для 49 альтернативних моделей (другий рядок табл. 1), істотно не змінюючи час кодування та декодування. Тому для цілих зображень ми рекомендуємо обирати різницеву кольірну модель максимум з 19 альтернативних, а для фрагментів – з 16 основних альтернативних різницевої кольірних моделей.

V. ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Зменшити КС зображень в трикомпонентних кольірних моделях можна не лише за рахунок декореляції даних окремих компонентів, а й за допомогою міжкомпонентної декореляції шляхом переходу до різницевої кольірних моделей.
2. Для забезпечення найменших КС різницевої кольірну модель з цілими коефіцієнтами для цілого зображення варто формувати максимум з 19-ти альтернативних (16-ти основних альтернативних з наведеного переліку і трьох з симетричними різницями).
3. З метою підвищення ефективності застосування різницевої кольірних моделей з цілими коефіцієнтами інтервали з максимальною кількістю різниць базових компонентів R , G , B слід зміщувати до середини діапазону можливих значень. Такі зміщення замість зміщень медіан окремих компонентів дають змогу додатково зменшити КС в середньому на 0.02 брв.
4. Різницевої кольірні моделі з цілими коефіцієнтами дають змогу суттєво підвищити ефективність стиснення без втрат трикомпонентних фотореалістичних зображень у форматах, що використовують предиктори, і тому можуть бути впроваджені в наступні версії цих форматів на рівні стандартів.

Надалі, з метою додаткового зменшення розмірів файлів стиснутих зображень без втрат і прискорення декодування в процесі прогресивного ієрархічного стиснення, нами планується дослідити ефективність застосування різницевої кольірних моделей [5-6] до окремих фрагментів зображень.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest and C. Stein, Introduction to Algorithms. *Third Edition*. Kiyv : Dialektika, 2020. Vol. 1. 648 p. (In Ru).
- [2] J. Miano. Compressed Image File Format: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP. New York : Addison Wesley, 1999. 264 p.
- [3] D. Solomon. A Guide to Data Compression Methods. New York : Springer, 2002. 295 p.
- [4] R. Gonzalez and R. Woods. Digital Image Processing. 4th ed., London : Pearson, 2017. 1192 p.
- [5] О. В. Шпортко. Використання різницевої кольорних моделей для стиснення RGB-зображень без втрат. *Відбір і обробка інформації*. 2009. № 31 (107). С. 90–97.
- [6] A. Shportko, A. Bomba and V. Postolatii. Programming the Formation of Difference Color Models for Lossless Image Compression. In *Proceedings of the 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2023)*, April 20-21, 2023. Kharkiv, Ukraine. Vol. 3. Pp. 53–68, URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3403/paper5.pdf>.
- [7] A. Shportko and V. Postolatii. Development of Predictors to Increase the Efficiency of Progressive Hierarchic Context-Independent Compression of Images Without Losses. *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021)*, April 22-23, 2021, Kharkiv, Ukraine. Vol. 1. Pp. 1026-1038. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2870/paper77.pdf>.
- [8] ACT – Test Files. [Online]. URL: <http://www.compression.ca/act/act-files.html>. (Accessed: October 09, 2023).



ГІДРОІНФОРМАТИКА ТА УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ

A Design Water Discharge Maxima Forecasting Method Based on Observation Data Using Plotting Position Formulas

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.061>

Dmytro Stefanyshyn

Department of Natural Resources

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

Kyiv, Ukraine

d.v.stefanyshyn@gmail.com

Abstract—Plotting position formulas provide a non-parametric means to estimate the observed hydrological data probability distribution. In particular, using a plotting position formula, a plot of the estimated values from a theoretical parametric probability distribution can be compared with the observation data. It allows an examination of the adequacy of the fit provided by parametric probability distributions. However, results of calculating empirical annual probabilities of exceedance observed maxima water discharges show an increase in the divergence between the estimates obtained using the different plotting position formulas in case of more extreme events. Thereby, the choice of a relevant plotting position formula becomes a challenge. Different plotting position formulas may be admissible options. This article shows that the divergence between the plotting position estimates can be extrapolated to predict design maxima water discharges of low exceedance probabilities.

Keywords—extrapolation; forecasting; observation data; plotting position formulas; uncertainty.

I. INTRODUCTION

There are two basic approaches to forecasting in modern hydrology and water management. These are a probabilistic approach and genetic (deterministic) means. The genetic methods are more adequate and scientifically correct but complicated to realize in practice because, in the majority, river runoff reasons and processes are complex, multifactorial, interrelated, and stochastic. Therefore, the probabilistic methods based on hydrological observation data statistic analysis have been more popular in studying and predicting diverse design hydrological characteristics. In particular, it is in the case of forecasting maxima water discharges relating to riverine floods [1–3].

The probabilistic approach is based on frequency analyses of observation data [4]. Usually, the time series of observed maxima water discharges are considered and analyzed in the frame of the stationary hypothesis. To forecast design discharges of low annual probability of exceedance, parametrical probability distributions are used as predictive models [2]. Returning to the problem of flood risk management, it should be reminded that Directive 2007/60/EC (the EU Flood Risk Directive) [5] defines flood risk quantitatively as “the combination of the probability of a flood event and the potential adverse

consequences for human health, the environment, cultural heritage and economic activity associated with a flood event”. Thus, in any case, the quantitative flood risk assessment will require the calculation of the probabilities (frequencies) of observed maximal (peak) flood discharges.

Hydrological maxima are specific extreme events. In theory, they are not limited to the upper limit. Usually, time series of observed pick discharges hold an essential positive asymmetry (skewness); sometimes – strong outliers [4]. Hydrologists are aware that the true probability distributions of maxima discharges of rivers are not being identified. In general, there is no theoretical or other proper justification for choosing an appropriate parametric probability distribution to predict peak discharges of floods using observed data [6]. Practice shows different distributions can well fit the observed time series of annual maximum discharges. However, they can forecast various values of peak discharge Q (m^3/s) of a chosen annual probability of exceedance P (1/year). Vice versa, depending on different distributions, the water discharge can have different values of probabilities of exceedance [3; 6–9].

II. THE PROBLEM FORMULATION AND THE OBJECTIVE OF THE PAPER

There are a lot of standardized probability distribution functions [10] that can be possible options (Table I) to choose from, and any of them might be considered a permissible hypothesis [1; 3; 4; 6–9].

TABLE I. STANDARDIZED PROBABILITY DISTRIBUTION FUNCTIONS IN FREQUENCY ANALYSIS OF MAXIMUM DISCHARGES [10]

Probability Distribution Functions	Country
Pearson type III distribution (P3)	China, Switzerland
Logarithmic Pearson type III distribution (LP3)	USA, Canada, India
Extreme value type I, type III distributions (EV1, EV3), Generalized extreme value distribution (GEV)	Germany, Great Britain, France
Two, Three parameters log-normal distribution (LN2, LN3)	Japan
Extreme value type I distribution (EV1)	Sweden, Norway
Kritskyi-Menkel three-parameter distribution (KM3)	Ukraine, former USSR countries

To test them and choose the best option, a plot of the estimated values from a theoretical parametric

probability distribution is compared with the observation data. However, the choice of a relevant plotting position formula may also be a challenge when fitting parametric probability distributions [11]. More than seventeen different plotting position formulas have been proposed by hydrologists and statisticians over the years [12]. Some of the plotting position formulas, most frequently appearing in the hydrological literature, are shown in Table II. All these formulas provide a non-parametric means to estimate the observed data probability distribution. However, there is no worthwhile criterion for comparing plotting position formulas to choose the more appropriate one relating to a real case study.

TABLE II. TYPICAL PLOTTING POSITION FORMULAS [6, 11-13]

Author (year)	Formula to calculate P_m (1/year) ^a
Hazen (1914)	$(m - 0.5)/n$
Gringorten (1963)	$(m - 0.44)/(n + 0.12)$
Nguyen (1989)	$(m - 0.42)/(n + 0.3C_S + 0.05)$
Cunnane (1978)	$(m - 0.4)/(n + 0.2)$
Blom (1954)	$(m - 3/8)/(n + 1/4)$
Hosking (1990)	$(m - 0.35)/n$
Tukey (1962)	$(m - 1/3)/(n + 1/3)$
Goel (1993)	$(m - 0.02C_S - 0.32)/(n - 0.04C_S + 0.36)$
Beard (1945)	$(m - 0.3175)/(n + 0.365)$
Kim (2012)	$(m - 0.32)/(n + 0.0149C_S^2 - 0.1364C_S + 0.3225)$
Lebedev (1952), Chegodaev (1965)	$(m - 0.3)/(n + 0.4)$
Adamowski (1985)	$(m - 0.25)/(n + 0.5)$
Weibull (1939)	$m/(n + 1)$

a. P_m is the empirical probability of exceedance of the m -th order observed value, m is the rank of the value, where the highest one being "1", and n is the number of observed statistics

Perhaps, in time, we will know which of the recommended parametric probability distributions or plotting position formulas were better in a contest of forecasted values of future events. However, it may be checked only after those events happen. In any case, while forecasting, we should regard both the natural (stochastic) uncertainty of observation data and the epistemic (non-stochastic or subjective) uncertainty relating to applying different models [3; 6; 8; 9].

This paper aims to present for discussion a new numerical-analytical method of forecasting design maxima discharges using observation data. It is based on extrapolation of the divergence between the empirical probability estimates that can be obtained by different plotting position formulas. The method is presented in the case of forecasting the maxima discharges of 0.5% and 1% annual probability of exceedance for the Uzh River, the Transcarpathia region, Ukraine, using the hydrological station (HS) "Uzhhorod" observation data from 1947 to 1999.

III. MATERIALS AND METHODS

The study employs a time series of maximum discharges of the Uzh River observed at the HS "Uzhhorod" from 1947 to 1999 [6]. The data sample length is 53 years. The maximum discharge within the data sample is 1680 m³/s (1957); the minimum – of 146 m³/s (in 1961). The mean peak discharge is 689 m³/s; the sample standard deviation – of 364 m³/s. The

coefficient of variation C_V of the time series is 0.53, the skewness C_S is 0.52, and the C_S/C_V is 0.99.

In the study, the scientific methods of theoretical and empirical research, analysis and synthesis, expert evaluation and comparison, formalization and modeling were used, including (1) extrapolation methods [14]; (2) fundamental and practical methods of mathematical statistics [11–13; 15]; (3) specific statistical methods in hydrology [1–4; 6–10]; (4) utility theory methods [16; 17] and decision making methods under risk and uncertainty [8; 9; 18].

To test the proposed forecasting method based on observation data using plotting position formulas, thirteen such formulas were used (See Table II). They were considered in terms of possible expert judgments (suggestions) for assessing the annual empirical probabilities of exceedance of observed maxima discharges. As possible theoretical alternatives for forecasting design maxima discharges of the Uzh River at the HS "Uzhhorod" considered were five parametric distributions: 1) the Kritskyi-Menkel three-parameter distribution (KM3) ($C_V = 0.53$, $C_S = C_V$); 2) Pearson's type III distribution (P3) ($C_S = 0.52$); 3) the Extreme value type I distribution (Gumbell's type I distribution, EV1); 4) the Logarithmic Pearson type III distribution (LP3) ($C_S = -0.44$); and 5) the Two parameters logarithmic-normal distribution (LN2).

IV. THE PRESENTATION OF THE PROPOSED FORECASTING METHOD

A. Preliminary modeling and making assumptions

The pre-modeling included calculating empirical annual probabilities of exceedance P_m observed maxima discharge employing various plotting position formulas depending on the rank $m = 1, \dots, n$ of the observed values, where the highest one has the rank $m = 1$, and $n = 53$ is the number of observed data. The probabilities P_m were presented as percentages.

Four model cases of forming a data sample were considered. The first model data sample included observed maxima water discharges from 1947 to 1976 (30 years); the second data sample was from 1947 to 1984 (38 years); the third data sample was from 1947 to 1992 (46 years); the fourth (control sample to test the method) was from 1947 to 1992 (53 years).

It was revealed that different plotting position formulas provide similar results for high probable events with short return periods $T_{r,m}$ ($T_{r,m} = 1/P_m$, or $T_{r,m} = 100/P_m$ if P_m is presented as percentages). These events have return periods $T_{r,m}$ of 5 years or less; the annual probabilities of exceedance P_m are 20% and more. However, while enlarging the modeling horizon towards low probable (more extreme) events, the disagreement (divergence) between results tends to increase. The same conclusion applies to the chosen alternative parametric probability distributions.

As a metric of disagreement between probabilities obtained using different plotting position formulas, the divergence indicator d_m was proposed [6]:

$$d_m = P_{m,i} / P_{m,j}, \text{ or } d_m = T_{r,m,j} / T_{r,m,i}, i \neq j, \quad (1)$$

where $P_{m,i}$, $P_{m,j}$ are the empirical annual probabilities of exceedance of the observed maxima discharges, and $T_{r,m,i}$, $T_{r,m,j}$ are their return periods calculated using the i -th and j -th counterparty plotting position formulas, which provide $P_{m,i} > P_{m,j}$, $T_{r,m,j} > T_{r,m,i}$, and $d_m > 1$ (e. g., Weibull's and Hazen's formulas giving marginal, i.e. maximum and minimum, plotting position probability values), correspondingly; m is a rank of a maxima discharge where the highest one has the rank $m = 1$.

As a result, regression dependencies relating to the indicator d_m can be defined: (a) between the return periods $T_{r,m,i}$, $T_{r,m,j}$ calculated using the i -th and j -th plotting position formulas and the divergence indicator d_m ; (b) between the observed maxima water discharges Q_m and the indicator d_m . The regressions $d_{m,i} = f(T_{r,m,i})$ and $d_{m,j} = f(T_{r,m,j})$ indicate that further enlarging of the return period of the observed maxima discharge may correspond to an increase in the divergence in plotting position estimates the different formulas provide. This disagreement depends on the plotting position formulas chosen to be compared. The regression $d_m = f(Q_m)$ indicates that further enlarging of the observed maxima discharge may also correspond to an increase in the divergence in plotting position estimates the different formulas provide. By estimating the indicator d_m and building these regressions, we can make predictions by applying extrapolation. In the first step, the prediction is implemented using the direct dependencies between the disagreement indicator values and the design discharge return period values. In the second step, it is used the dependence between the discharges and the divergence indicator values. Predicting design discharges is made using an iterative calculation method.

B. Using the Fishburn rule to overcome epistemic uncertainty of plotting position formulas

Results obtained using different plotting position formulas may be considered expert estimates [6]. Under decision-making, these expert judgments may acquire different importance [16–18]. For example, in flood management strategies, the plotting position estimates obtained according to Weibull contribute to choosing more cautious decision options. However, more cautious options can be associated with additional capital costs. Using Hazen's plotting position formula contributes to choosing options with lower capital costs. In turn, it may inflict an increase in flood losses in future.

When making decisions, different plotting position formulas can be considered indicators of the predisposition to more cautious or less expensive decision options. In other words, various plotting position estimates obtained using different plotting position formulas can acquire their weight level in a system of indicators' importance under the decision-making process [6].

An optimal distribution of the weights of the indicators from the point of view of informational entropy is referred to as Fishburn's rule. The Fishburn rule considers that the level of indicators' importance is determined only by arranged in descending order of importance [16; 17]. According to this rule, the "weight" w_i for the i -th plotting position estimate $P_{m,i}$ obtained using the i -th formula can be calculated as:

$$w_i = 2(k - i + 1) / (k + 1)k, \quad (2)$$

where i is the rank of the i -th plotting position estimate obtained using the i -th formula taking into account the level of the formula importance; the highest estimate gets the rank $i = 1$ when there is a predisposition to more cautious options, and, vice-versa, when there is a predisposition to options with lower capital costs, the smallest one has the rank $i = 1$; k is the total number of the ranked-set plotting position estimates (formulas).

As a result, depending on the selected significance option of the different plotting position formulas, the rank-weighted estimate of the annual plotting position probability $P_{m,w}$:

$$P_{m,w} = \sum P_{m,i} \cdot w_i, \quad i = 1, \dots, k, \quad (3)$$

where m is the rank of an observed maxima water discharge Q_m (m^3/s).

Depending on the selected significance option of the different plotting position formulas, using the Fishburn rule enables getting two possible rank-weighted estimates of the annual plotting position probability $P_{m,w}$: the rank-weighted upper bound estimate (sup) $P_{m,w,sup}$, the rank-weighted lower bound estimate (inf) $P_{m,w,inf}$. The rank-weighted upper bound estimate $P_{m,w,sup}$ will correspond to the predisposition to more cautious decision options. The rank-weighted lower bound estimate $P_{m,w,inf}$ will correspond to the predisposition to less expensive decision options.

Table III shows the results of the forecasting using the proposed method. These are values of the design maxima discharges of 1% and 0.5% annual probabilities of exceedance for the Uzh River, the HS "Uzhhorod". Forecasting was carried out for four model cases of forming data samples.

TABLE III. RESULTS OF FORECASTING THE DESIGN MAXIMA DISCHARGES ($P = 1$ AND 0.5 1/YEAR, %), THE UZH RIVER, THE HS "UZHGOROD"

Data samples (years)	Probability of exceedance P (1/year, %)	Design maxima discharge Q (m^3/s)	
		Inf	Sup
1947-1976	1	1995	2095
	0.5	2545	2730
1947-1984	1	1890	1988
	0.5	2332	2490
1947-1992	1	1788	1908
	0.5	2200	2324
Control sample, 1947-1999	1	1738	1805
	0.5	2113	2222

It should be noted the high values of coefficients of determination (R^2) of the dependencies $d_{m,i} = f(T_{r,m,i})$, $d_{m,j} = f(T_{r,m,j})$, and $d_m = f(Q_m)$ when regression modeling: 0.9996, 0.9999, and 0.9997 in the case of the data sample of 1947–1976 years; 0.9997, 0.9998, and 0.9998 (1947–1984 years); 0.9997, 0.9998, and 0.9998 (1947–1992 years); 0.9995, 0.9998, and 0.9983 in the case of the control data sample of 1947–1976 years.

It is worth also noting the goodness of fit of the maxima discharges of 1% probability of exceedance obtained by extrapolation of plotting position probabilities using the proposed method to the Extreme value type I distribution (Gumbell type I, EV1) (See Control data sample of 1947–1999 years). The design discharge of 1% probability of exceedance obtained using the EV1 distribution is 1832 m³/s. The upper bound estimate (sup) of such a discharge using the proposed method and the Fishburn rule is 1805 m³/s. The relative prediction error is less than 1.5%. The lower bound estimate (inf) of such a discharge using the proposed method and the Fishburn rule is 1738 m³/s. The relative prediction error is 5.4%. However, it is worth noting the goodness of fit of the maxima discharges of 0.5% probability of exceedance obtained by extrapolation of plotting position probabilities using the proposed method to the Logarithmic Pearson type III distribution (LP3). The design discharge of 0.5% probability of exceedance obtained using the LP3 distribution is 2130 m³/s. The upper bound estimate (sup) of such a discharge using the proposed method and the Fishburn rule is 2222 m³/s. The relative prediction error is approximately 4.2%. The lower bound estimate (inf) of such a discharge using the proposed method and the Fishburn rule is 2113 m³/s. The relative prediction error is less than 0.8%.

V. SOME DISCUSSION REMARKS AND CONCLUSIONS

When we forecast extreme (maxima) hydrological characteristics, can epistemic (non-stochastic) uncertainty be a challenge? Yes, it can. It can be a high challenge. However, the multi-model approach may promote revealing epistemic uncertainty and supporting the choice of a better parametric probability distribution.

There is no proper theoretical or another similar justification for choosing an appropriate probability distribution to forecast maxima discharges of floods using observed data. Plotting position formulas provide a non-parametric means to estimate the observed data probability distribution. Using a plotting position formula, a plot of the estimated values from a theoretical parametric probability distribution can be compared with the observed data. It allows a visual examination of the adequacy of the fit provided by alternative parametric probability distributions.

However, there are more than seventeen different plotting position formulas to fit theoretical parametric probability distributions with the observed data. The issue is the choice of an unbiased empirical formula to plot the observed data. Any plotting position formula can be an option for fitting parametric probability distributions. Based on a multi-model approach, the proposed numerically-analytical method may promote a justification for choosing an appropriate parametric probability distribution to forecast maxima discharges of floods using observed data.

The proposed method applies numerical calculations of empirical probabilities using different plotting position formulas and extrapolation of the divergence between the obtained estimates. The design maxima water discharge estimates forecasted by this method are also noteworthy. In terms of forecast accuracy, these estimates do not differ principally from estimates that can be obtained using well-known, traditional parametric probability distributions.

REFERENCES

- [1] R. Maity. Statistical Methods in Hydrology and Hydroclimatology. *Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering*. 2018.
- [2] K. Okoli, K. Breinl, M. Mazzoleni, and G. Di Baldassarre. Design Flood Estimation: Exploring the Potentials and Limitations of Two Alternative Approaches. *Water*. 2019. Vol. 11 (4). 729. Pp. 1–11.
- [3] V. Korbutiak, D. Stefanyshyn, O. Lahodniuk, and A. Lahodniuk. The combined approach to solving issues of the flood hazard assessment using water gauge records and spatial data. *Acta Sci. Pol. Architectura*. 2020. Vol. 19 (1). Pp. 111–118.
- [4] J. R. Stedinger, R. M. Vogel, and E. Foufoula-Georgia. Frequency Analysis of Extreme Events. In *Maidment, D.R., Ed., Handbook of Hydrology*. McGraw Hill, New York, Chapter 18 (18.1-18.66), 1993.
- [5] Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the EU*. 2007. L288/27.
- [6] D. Stefanyshyn. Testing a numerically-analytical method for prediction design maxima discharges of floods using plotting position formulas: the river Uzh case, the “Uzhhorod” gauging station data. *Environmental safety and natural resources*. 2023. Vol. 46 (2). Pp. 138–162.
- [7] H. Apel, A. H. Thielen, B. Merz, and G. Blöschl. A Probabilistic Modelling System for Assessing Flood Risks. *Natural Hazards*. 2006. Vol. 38. Pp. 79–100.
- [8] H. Apel, B. Merz, and A. H. Thielen. Quantification of uncertainties in flood risk assessments. *Int. Journal of River Basin Management*. 2008. Vol. 6 (2). Pp. 149–162.
- [9] D. Stefanyshyn. Probability assessment of the Kyiv reservoir overflow. *Environmental safety and natural resources*. 2021. Vol. 40 (4). Pp. 73–99.
- [10] M. Ren, X. He, G. Kan, et al. A Comparison of Flood Control Standards for Reservoir Engineering for Different Countries. *Water*. 2017. Vol. 9 (3), 152. Pp. 1–13.
- [11] C. Cunneane. Unbiased plotting positions – A review. *Journal of Hydrology*. 1978. Vol. 37 (3-4). Pp. 205–222.
- [12] L. Makkonen. Plotting Positions in Extreme Value Analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2006. Vol. 45. Pp. 334–340.
- [13] H. L. Harter. Another look at plotting positions. *Communications in Statistics – Theory and Methods*. vol. 13 (13). Pp. 1613–1633.
- [14] C. Brezinski, and M. Redivo-Zaglia. Extrapolation and Rational Approximation. *The Works of the Main Contributors*. Cham : Springer Nature, 2020.
- [15] L. J. Savage. The foundations of statistics. New York : Wiley, 1954.
- [16] P. C. Fishburn. Utility Theory for Decision Making. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1970.
- [17] P. C. Fishburn. Non-transitive measurable utility for decision under uncertainty. *Journal of Mathematical Economics*. 1989. Vol. 18 (2). Pp. 187–207.
- [18] M. J. Kochenderfer. Decision-making under uncertainty. Theory and Application. Massachusetts : The MIT Press, 2015.

Application of geoinformation technology methods for researching the morphodynamics of river and coastal processes

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.062>

Boris Ostroverkh

Hydromechanics Institute of the NAS Ukraine,
Kyiv, Ukraine
ostro@ukr.net

Lyudmila Potapenko

Hydromechanics Institute of the NAS Ukraine,
Kyiv, Ukraine
l.potapenko@ukr.net

Abstract—This report is devoted to aspects of the application and improvement of methods of geoinformation systems and information technologies to solving problems of hydromorphodynamics for the development of measures to ensure the stable state of the sea approach channels looking on the example of the deepwater Danube-Black Sea shipping channel. Mathematical numerical methods with a GIS database were used for modeling river and coastal processes, creating calculation grids and postprocessing the numerical results.

Keywords—geoinformation systems; bathymetric and hydrological data base; binding of grids and bathymetry nodes to maps; numerical methods of hydromorphodynamics; cartographic methods of space images and results analysis.

I. INTRODUCTION

The analysis of the state in the zones of recreational and industrial use of riverbeds and banks of rivers, deltas, seas and water reservoirs showed that the lack of regulation and coastal protection structures leads to the depletion of beaches and restraining the development of coastal infrastructure. Designed modern engineering protective structures must prevent the reduction of the area and length of territories along the water cut and comply with the principle of environmental sustainability. Currently, the principle of natural analogues, developed at the National Academy of Sciences Hydromechanics Institute by B.A. Pyshkin in 1954 [1] and improved and implemented in many developments by Yu.M. Sokolnikov, V.V. Khomytskyi [4; 5] and others. The generalization of methods of calculation and research of structures in the form of natural analogues was developed in the works of L. van Rijn, N. Christensen, K. Mangor [2; 3; 6; 7], as well as by authors based on CFD complexes [12; 13]. A possible option for ecologically safe development and protection of coastal areas can be the creation of natural bays by the construction of intermittent breakwaters [4; 5].

One of the more effective means of researching the condition of coastal zones in the conditions of wide application of technical, space and computer technologies arose due to the development of geoinformation technologies (GIS) as a basis for saving and processing the results of bathymetric, geological,

hydrological, meteorological measurements for the analysis of hydromorphodynamic processes using mathematical modeling methods [8; 9; 12]. Currently, GIS software complexes such as ArcGIS, MapInfo, QGIS and others have been created for open use for applied tasks.

The application of geoinformation systems and technologies takes place in the following areas of hydromorphodynamics:

- Use of GIS to compile a geolocation database of signs of morphodynamic changes and linking to special space images and research objects;
- Conducting a geo-informational analysis of the results of bathymetric measurements and comparison of space images to determine the morphological changes of riverbeds, mouths and banks of rivers and shipping channels;
- Mathematical numerical methods of modeling river and coastal processes using a GIS database for creating calculation grids and postprocessing the results of numerical calculations taking into account boundary conditions.

In fact, in recent years, a new field has been created – mathematical geography.

With the help of GIS, a database is created that contains hydrological, geological characteristics and geolocation, as well as their properties or attributes [13; 14]. A GIS database can be stored in various forms such as a set of individual data files or spatially supported data, or part of a project, for use as input data and for analysis and visualization of results.

As an example, we will consider here aspects of the application of GIS and IT for drawing up a numerical model of analysis and substantiation of measures to ensure the stable condition of the Sea Approach Channel (SAC) at the Danube-Black Sea Deep-Navigation Channel (DNC). The current state of the dynamics of the marine approach channel (see the in Fig. 1) shows the zone of flow spreading from the mouth of the Bystroy and siltation of the SAC between the protective dam (left flooded bank of the SAC) and Ptashina Kosa (right flooded bank of the SAC). At the same time, there is a significant deviation of the canal route from the design IPC. Preliminary observations of channel, bar,

and estuarine processes along the canal route showed that the amount of suspended and entrained sediments carried by the Bystry estuary onto the SAC route which is wider than the Bystry arm, there is siltation of the channel route, pushing and simultaneous erosion of the flooded left bank bank, and even signs of meandering are observed (see Fig. 1). In order to get rid of such negative phenomena during the implementation of the scientific support of the GSH project, the Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences (IGM, Department of Hydrodynamics of Channel and Wave Flows) proposed measures at the mouth of the Bystroy arm, which are based on the method developed by the institute for the anticipatory creation of natural analogs of river and sea coastal forms. These proposals were substantiated by scientific research, field observations and analysis of bathymetric surveys of dredging operations at the IPC over a long period. Creation of the proposed measures will ensure a significant reduction in the amount of repair excavations. At one time, they were provided to the project organizations to be implemented in the navigation channel project. Structural elements are taken into account in the modeling – protective dams, the presence of natural formations in the form of a right-bank spit and an estuarine bar, on which the dam and the opening of the SAC are located (Fig. 2).



Figure 1. Current space image of the SAC



Figure 2. Spatial image of the research area

Modeling was carried out on the basis of bathymetry measurements (Fig. 2, 3). It can be seen from the pictures that the bottom has a complex topography. The meandering of the stream and the formation of a slot basin with a depth of more than 8 m are observed.

II. MATHEMATICAL MODEL OF THE MORPHODYNAMIC PROCESS

To calculate flow dynamics and morphodynamics, the FST2DH (2D Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model) program [14] is used, which implements the finite element method for calculating non-stationary depth-averaged surface water flow. The system of calculation equations includes mass and momentum transfer equations, bottom deformation equations, and drag and suspended sediment transfer. The mass transfer equation, taking into account the deformation of the bottom, has the form

$$\frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} = q_m,$$

where $z_w = z_b + H$ is water surface level, z_b – depth of erosion zone; q_1, q_2 – volumetric flow rates in x, y per unit of flow width; q_m – inflow (flow) per unit area.

Equations of momentum transfer in specific costs have the form

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{q_1^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + g H \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{bx} - \frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{q_2^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + g H \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{by} - \frac{\partial (H \tau_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial (H \tau_{yy})}{\partial y} \right] = 0$$

where τ_{bx}, τ_{by} – bottom shear stresses are stresses caused by flow turbulence, which are considered to be proportional to the gradients of the depth-averaged velocity; β – the correction factor of the flow momentum, which takes into account the change in velocity in the vertical direction.

Changes in the bottom surface during erosion and deposition are determined by the equation

$$(1 - \eta_s) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{s1}}{\partial x} + \frac{\partial q_{s2}}{\partial y} = 0$$

where η_s is the porosity of the bottom material, q_{s1}, q_{s2} is the volume flow rate of entrained and suspended sediments per unit width of the current. The sediment concentration is described by the transport equation

$$\frac{\partial (C_s H)}{\partial t} + \frac{\partial (C_s q_1)}{\partial x} + \frac{\partial (C_s q_2)}{\partial y} = C_{es} (C_s^* - C_s)$$

where C_s^* – is the equilibrium concentration, which describes the state of equilibrium of sediments rising from the bottom and settling.

Boundary conditions. In the upper part of the flow, the flow rate Q is set, in the lower part – the level of the water surface z_w . The elements of the calculation grid are directed parallel to the supports and have a rectangular shape of $20 \times 40 \text{ m}$, in the zone of IPC the grid thickens to $20 \times 20 \text{ m}$ (Fig. 3). The effect of compression of the flow by structures is taken into account by the uniform distribution of hydrodynamic resistance across the grid element containing impermeable parts of the structure (pillars, dams).

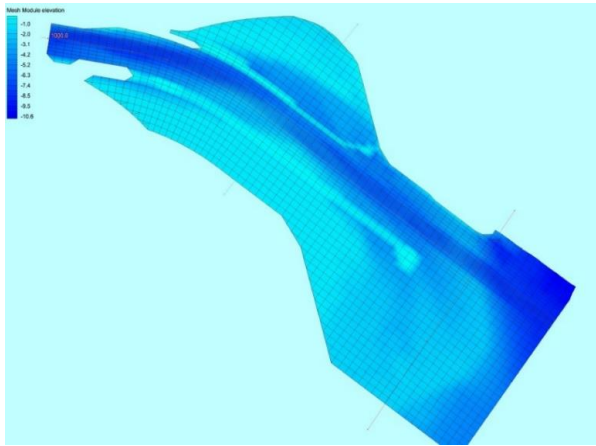


Figure 3. Bathymetric data over calculation grid

III. RESULTS OF THE NUMERICAL EXPERIMENT

Modern calculation complexes based on numerical calculation methods make it possible to evaluate the kinematics of the flow and erosion of the river. Figure 4 shows the calculation results steady flow with channel-forming flows $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ with boundary conditions $z_w = 0.2 \text{ m}$. Flow speed of $1.0\text{--}1.5 \text{ m/c}$ is observed on a straight section of the channel.

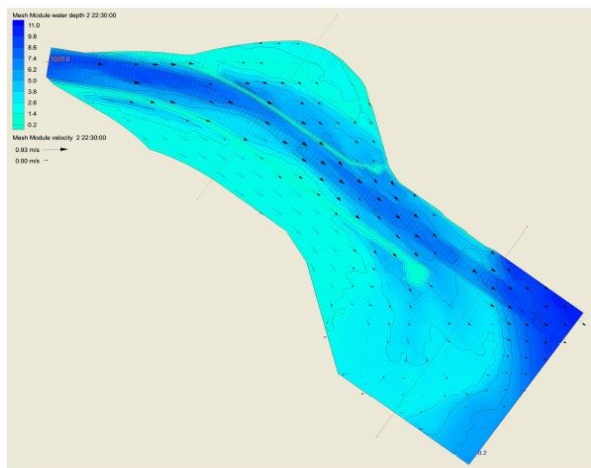


Figure 4. Kinematic picture of the flow on the SAC

The use of GIS tools makes it possible to estimate the extent and location of erosion of bedforms eroded noncohesive soil (Fig. 5) and underwater elements of structures made of local materials.

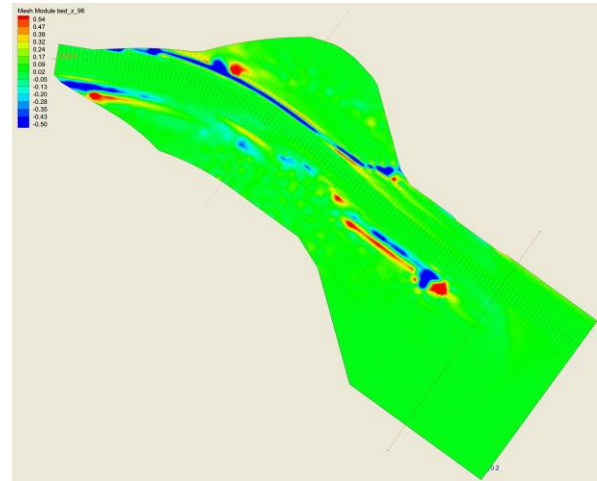


Figure 5. Зміни глибин в результаті ерозії брівок МПК

IV. CONCLUSIONS

A program for calculating hydromorphodynamic processes was created using computer modeling tools. On the basis of morphodynamic analysis with the help of GIS the results of mathematical modeling, measures to stabilize the design profile of the DNC SAC were developed and substantiated, which are proposed to be carried out in stages:

– The first stage :

===== – Carrying out of load washing in the indicated in fig. 6 places of the shallow water of the directing jetties with scooping materials during the dredging of the channel by the method of gradual extension starting from the left bank of the canal with the simultaneous attachment of ridges with bushy plants (possibly in gabions) to avoid erosion, which will occur in the case of creating submerged jetties structures. This measure is practically ecological, does not have a negative impact on the environment, but complements the existing natural form – the right-bank Bird Spit and the left-bank shoal – with sustainable natural analogues in the form of coastal bars, which reduces the time and volume of dredging and does not require significant additional costs. After the natural overgrowth of the braids and jet directing groins, the amount of dredging will be minimized.

The second stage:

===== – After the completion of the first stage, the dredged materials may be used to backfill the protective embankment (permanently, instead of dumping on the sea dump) of the natural bar beach slope type on the seaward side of the capital jet-directing protective dam (Fig. 2, 6), which will significantly increase its reliability.



Figure 6

The proposals remain relevant even now in connection with the violation of grain agreements by the occupiers and the need for reliable transport of goods by sea vessels to the Danube ports. They can be carried out in parallel with the dredging works, which speeds up their execution, practically does not require significant additional costs and will ensure a further reduction in the amount of repair dredges and the stability of protective structures and IPC. We offer to consider and take into account our proposals during the discussion and design of measures for gradual deepening over to 7 m and reliable operation of the deep-sea shipping passage through the mouth of the Bystry and other arms of the Cylia delta with representatives of the design and operation organizations.

REFERENCES

[1] B. A. Pyshkin. Dynamics of water reservoirs banks. Kyiv : Naukova dumka, 1972 (in rus).

[2] G. I. Sukhomel. Challenges in hydraulics of open channels and structures. Kyiv : Izd. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1949 (in rus).

[3] I.L. Rozovsky. Movement of water on the turning of an open channel. Kyiv : Izd. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1957 (in rus).

[4] Engineering protection and development of territories (handbook) / Edited by V. S. Nischuk and the participation of A. I. Bileush, V. V. Khomytskyi et al. Kyiv : Osnova, 2000 (in ukr)

[5] Y. N. Sokolnikov. Engineering morphodynamics of beaches and its applications. Kyiv : Naukova dumka, 1976 (in rus).

[6] L. C. van Rijn. *Basic hydrodynamic processes in the coastal zone*. [Online]. URL: www.leovanrijn-sediment.com. (Accessed: October 17, 2023).

[7] L. C. Van Rijn, and K. M. Wijnberg. One-dimensional modeling of individual waves and wave-induced longshore currents in the surf zone. *Coastal Engineering*. 1996. Vol. 28. Pp. 121–145.

[8] K. Mangor, N. K. Dronen, K. H. Kaergaard, and N. E. Kristensen. Shoreline management guidelines, Denmark : DHI, 2017.

[9] L. C. Van Rijn. Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*. 2011. Vol. 54(12). Pp. 867–887.

[10] V. V. Khomytsky. Environmental protection aspects of coastal hydraulic engineering. Kyiv : Nauk. dumka, 1983 (in rus).

[11] Y. P. Ilyin, L. N. Repetin, V. N. Belokopytov et al. Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine. *The Black Sea, Sevastopol: EkoSv*. 2012. Vol. 2. (in rus).

[12] B. N. Ostroverkh, and V. V. Khomitsky et al. Mathematical and physical modeling of drifting of the sea approach channel in the bar area of the navigable branch of the Kiliy Delta of the Danube. *Problems of water supply, drainage and hydraulics: Scientific and technical collection*. 2009. Vol. 12. Pp. 125–135 (in rus).

[13] B. M. Ostroverkh, and L. S. Potapenko. Solving problems of calculation and design of river and coastal structures using GIS methods. *Sat. Modern problems of creation and effective use of the unified geo-informational space of Ukraine when preparing and making management decisions*. Kyiv, 2007. Pp.1–6. (in ukr)

[14] D. C. Froehlich. User's Manual for FESWMS FST2DH Two-dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model. Release 3. Lexington : University of Kentucky, 2003.

Underground Water Resources Management for Flooding Prevention

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.063>

Olena Sierikova

Applied Mechanics and Environmental Technologies
Department
National University of Civil Defence of Ukraine
Kharkiv, Ukraine
sierikova_olena@ukr.net

Elena Strelnikova

A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering
Problems NAS of Ukraine
Kharkiv, Ukraine
elena15@gmx.com

Kyryl Degtyariv

A. Pidhornyi Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine
Kharkiv, Ukraine
kdegt89@gmail.com

Abstract—Technogenic factors that affect urban area flooding development, forecasts of improving groundwater level changes, and comprehensive management of urban groundwater must be taken into account and controlled. A three-dimensional mathematical model of groundwater level changes in cities has been developed, which takes into account atmospheric water infiltration, additional groundwater replenishment, transpiration, evaporation, evapotranspiration, and groundwater intake.

Keywords—flooding; groundwater level; environmental safety; flooding prediction; additional infiltration

I. INTRODUCTION AND LITERATURE REVIEW

Flooding is one of the most widespread modern exogenous geological processes that develops both under natural conditions and under the influence of technogenic factors. Technogenic factors are often decisive. The essence of this process is an increase in the groundwater level due to a violation of the territory water balance, which reaches critical values and requires the use of protective measures. This process is classified as one of the most dangerous for human life [1; 2].

It is known that the flooding process causes and activates a number of dangerous geological processes. Therefore, the flooding intensification, which has been taking place within certain regions of Ukraine in recent years, is a real threat to the safety of the population and the functioning of numerous economic facilities. In this regard, the issue of studying the conditions of development and distribution of flooded areas within the entire territory of the state, as well as the organization of monitoring thereof, becomes a priority and urgent. Under the growing influence of technogenic factors, there is a tendency to expand the areas of flooding and the negative impact on the environment [3; 4].

Underground water regime violation and the flooded territories development and expansion are the result of water losses from water supply communications, lack of stewardship towards the territories being developed, non-compliance with the legislation requirements in the design and construction of new facilities, non-implementation of state plans and programs due to insufficient funding, timely investigations, absence of retrospective analysis of the engineering and geological conditions of the built-up areas, the absence of high-quality long-term forecasts [5].

It is necessary to take into account technogenic factors that affect the flooding development of the urban area, improve forecasts of groundwater level changes, and comprehensive management of urban groundwater [6].

In papers [4; 7], a system for managing the flooding of urban areas has been proposed, which includes management and engineering measures to prevent and eliminate the flooding consequences, as well as an algorithm of actions during the monitoring of the groundwater level on flooded and potentially flooded areas.

The issue of groundwater flow has been discussed by many scientists from different aspects, for example, Klute [8] reduced the diffusion equation to an ordinary differential equation and applied the method of direct integration and iteration of the resulting equation, Verma [9] has obtained a solution to the equation describing the one-dimensional supply of groundwater for constant diffusion and linear conductivity using the Laplace transform. Prasad et al. [10] has created a numerical model for simulating moisture flow through unsaturated zones using the finite element method. Desai [11] has obtained a composite solution for the expansion of groundwater in the vertical direction. Shah K. and Kunjan T. [12] have obtained the solution of the Burger equation for the description of a one-dimensional reserve of groundwater by diffusion in a porous medium. Joshi and others [13] have gained the solution of the equation for one-dimensional vertical

groundwater recharge using a group theoretical approach. Nasseri et al. [14] have investigated the solution of the advection-diffusion equation based on the simplified Brooks-Corey model for soil conductivity and diffusion.

Koohestani N. has treated only natural factors affected on groundwater and based on this data made a prediction of changes in the groundwater balance [15].

II. METODOLOGY

A. Problem Statement

In contrast to the authors' previous studies [1–7], this paper considers the issue of forecasting changes in the groundwater level in a three-dimensional setting.

The filtration pressure equation in the follow form has been considered

$$\gamma^2 \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

Where h is the groundwater level, x, y, z are coordinates have been shown at Fig. 1, γ is the anisotropy coefficient.

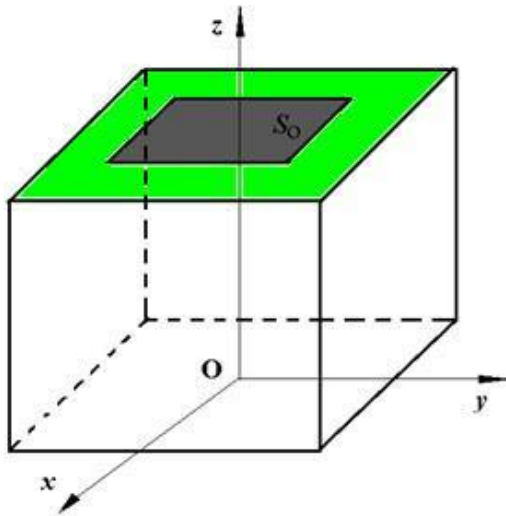


Figure 1. Calculation area to determine the groundwater level

The boundary conditions for equation (1) have been formulated, which include the artificial coverings presence, natural infiltration, evaporation and transpiration, as well as the effect of evapotranspiration. These conditions have been corresponded to the unknown function values, or its normal derivative at the boundaries of the computational domain. The rectangular parallelepiped has been assumed as the computational domain. The lower and upper faces of this parallelepiped are rectangles S with sides $[2a, 2b]$.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Mathematical models in 2D and 3D formulation work from any value of initial groundwater level.

Therefore, the groundwater level changes values obtained at 3D simulation are less than ones that have been gained as the calculations result carried out according to the two-dimensional theory. Therefore, data of 2D simulation could be applied as an upper bound for groundwater level changes estimation. Groundwater level changes at other values of the

present demonstrated the similar behavior. These data have been shown at Fig. 2.

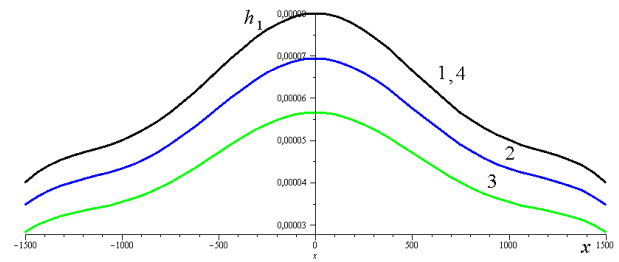


Figure 2. Groundwater level changes at other values of y .

Groundwater level changes at $y=-2$ and different values of z have been presented at Fig. 3.

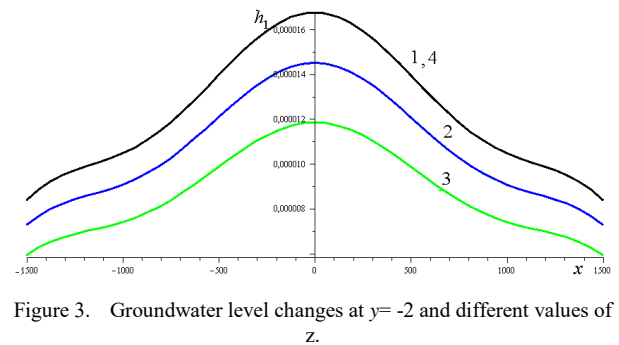


Figure 3. Groundwater level changes at $y=-2$ and different values of z .

Three-dimensional modeling of the groundwater level changes, in contrast to the two-dimensional one, allows to take into account the evapotranspiration dependence on the artificial covers presence on the soil surface, which are unevenly located and have different filtration coefficients and caused corresponding changes in the urban groundwater level.

IV. CONCLUSION AND FURTHER RESEARCH

A three-dimensional mathematical model of groundwater level changes in urban areas has been developed, which takes into account atmospheric water infiltration, additional groundwater replenishment, transpiration, evaporation, evapotranspiration, and groundwater intake. The boundary conditions of the three-dimensional mathematical model have been formulated. The analytical solution of the differential filtration equations has been solved using the Maple computer program to create a model of groundwater level changes.

In three-dimensional modeling of the groundwater level changes processes, outcomes have been gained with a lower rise in the groundwater level than the calculation result has been obtained according to the two-dimensional theory, due to the consideration of changes in parameters in different areas. . Therefore, 2D modeling data could be used as an upper bound to estimate the groundwater level changes and 3D modeling for more accurate estimation.

It is planned to develop more accurate models of groundwater level changes over time, as well as a groundwater level management system that takes into account additional technogenic factors of water level changes.

REFERENCES

- [1] O. Sierikova, V. Koloskov, and E. Strelnikova The groundwater level changing processes modeling in 2d and 3d formulation. *Acta Periodica Technologica*. 2022. Vol. 53. Pp. 36–47. DOI: <https://doi.org/10.2298/APT2253036S>
- [2] E. N. Serikova, and V. V. Yakovlev. Additional infiltration to underground waters of big cities territory (on example Kharkiv region). *Proc. from Municipal Economy of Cities*. 2011. Vol. 97. Pp. 344–348.
- [3] E. Sierikova, and E. Strelnikova. Environmental safety of building development on the Kharkiv city flooding areas example. *Noble International Journal of Scientific Research*. 2019. Vol. 3(8). Pp. 72–78.
- [4] E. Serikova, E. Strelnikova, and V. Yakovlev. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City. *International Journal of Development Research*. 2015. Vol. 5(12). Pp. 6236–6240.
- [5] E. Serikova, E. Strelnikova, and V. Yakovlev. Mathematical model of dangerous changing the groundwater level in Ukrainian industrial cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. 2015. Vol. 1(2). Pp. 86–90.
- [6] E. N. Sierikova, and E. A. Strelnikova. Mathematical Modeling of Groundwater Level Changing with Considering Evapotranspiration Factor. *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering (IJMSME)*. 2020. Vol. 6(1). Pp. 19–25. DOI: <http://dx.doi.org/10.20431/2454-9711.061003>
- [7] E. Sierikova, E. Strelnikova, L. Pisia, and E. Pozdnyakova. Flood risk management of urban territories. *Eco. Env. & Cons.* 2020. Vol. 26(3). Pp. 1068–1077.
- [8] A. Klute. A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials. *Soil Science*. 1952. Vol. 73(2). Pp. 105–116.
- [9] A. P. Verma The laplace transform solution of a one dimensional groundwater recharge by spreading. *Annals of Geophysics*. 1969. Vol. 22(1). Pp. 25–31.
- [10] K. H. Prasad. Sensitivity to unsaturated soil properties. *Sadhana*. 2019. Vol. 26(6). Pp. 517–528.
- [11] N. B. Desai. The study of problems arises in single phase and multiphase flow through porous media. Ph.D. Thesis, South Gujarat University, Surat, India, 2002.
- [12] K. Shah, and T. Kunjan. Solution of Burger's Equation in a One-Dimensional Groundwater Recharge by Spreading Using q-Homotopy Analysis Method. *Eur. J. Pure Appl. Math.* 2016. Vol. 9(1). Pp. 114–124.
- [13] M. S. Joshi, N. B. Desai, and M. N. Mehta. One dimensional and unsaturated fluid flow through porous media. *Int. J. Appl. Math. and Mech.* 2010. Vol. 6(18). Pp. 66–79.
- [14] M. Nasser, Y. Daneshbod, M. D. Pirouz, G. R. Rakhshandehroo, and A. Shirzad. New analytical solution to water content simulation in porous media. *J. Irrig. Drain. Eng.* 2012. Vol. 138(4). Pp. 328–335.
- [15] N. Koohestani, M. M. Halaghi, and A. A. Dehghani. Numerical Simulation of Groundwater Level Using MODFLOW Software. *IJABIS*. 2013. Vol. 1(8). Pp. 858–873.

Коефіцієнт гідравлічного опору в трубах з однорідною зернистою шорсткістю

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.064>

Любов Волк

Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки
 Національний університет водного господарства та природокористування
 м. Рівне, Україна
l.r.volk@nuwm.edu.ua

Олександр Безусяк

Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки
 Національний університет водного господарства та природокористування
 м. Рівне, Україна
o.v.bezusyak@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

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 визначення закономірностей впливу основних діючих факторів, в межах існуючих областей, на значення коефіцієнта гідравлічного опору, вітчизняними та зарубіжними вченими виконано великий обсяг експериментальних та теоретичних досліджень. Але загальної формули для визначення коефіцієнта гідравлічного опору λ на даний час не існує [1–5].

У 1932–1933 рр. Й. Нікурадзе дослідив на гідравлічних установках вплив числа Рейнольдса на коефіцієнт гідравлічного опору в трубах з однорідною зернистою шорсткістю та в гідравлічно гладких трубах [2; 3]. Результати його дослідів з однорідною зернистою шорсткістю приведено на рисунку 1 у вигляді графіків в координатах $lg(100\lambda) = f(lg Re, r_0/k)$. Цінність цього рисунка, який називають графіком Нікурадзе, полягає в тому, що на ньому наглядно видно межі розташування ламінарного й турбулентного режимів та області гідравлічно-гладкого, доквадратичного та квадратичного опорів й зміну коефіцієнта гідравлічного опору в межах кожної області.

При ламінарному режимі коефіцієнт гідравлічного опору в координатах $lg(100\lambda) = f(lg Re)$ виражається графіком прямої лінії (рис. 1).

Залежність для визначення коефіцієнта гідравлічного опору

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (1)$$

Ця залежність справедлива тільки при $Re \leq 2320$, тобто вона відповідає лінії ламінарного режиму (рис. 1). В звичайних координатах має форму гіперболи, а в логарифмічних – відображає пряму лінію.

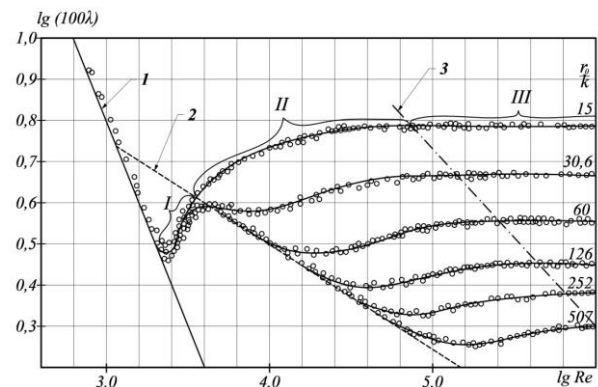


Рисунок 1. Графіки залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса та гладкості внутрішньої поверхні трубопроводів (за даними Й. Нікурадзе): 1 – ламінарний режим руху потоку; 2 – область гідравлічно гладкого опору (Г. Блазіус); 3 – межа між областями доквадратичного та квадратичного опору; I – перехідна область між ламінарним режимом потоку та областю гідравлічно гладкого опору; II – область доквадратичного опору; III – область квадратичного опору

При турбулентному режимі рідина рухається на багато швидше, ніж при ламінарному. Це призводить до виникнення значних градієнтів швидкості між суміжними шарами потоку турбулентного ядра, що сприяє створенню вихрового руху рідини, й призводить до зростання гідравлічних опорів, якими при ламінарному режимі можна було знехтувати.

При турбулентному режимі руху рідини між турбулентним ядром потоку і внутрішньою поверхнею трубопроводу існує ламінарний шар. При цьому товщина ламінарного шару загального потоку більша висоти виступів шорсткості. В цьому випадку шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу майже не впливає на характер руху

турбулентного ядра і, відповідно, втрати напору не залежать від шорсткості.

Вітчизняними й зарубіжними вченими виконано великий об'єм експериментальних й теоретичних досліджень з метою отримання розрахункових формул для визначення коефіцієнта гідравлічного опору в залежності від основних діючих факторів.

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 ρ , динамічна в'язкість μ , гідравлічний радіус потоку R , осереднена висота виступів шорсткості k та середня швидкість потоку \bar{u} .

III. РЕЗУЛЬТАТИ

Трубопроводи працюють при турбулентному режимі здебільшого в області доквадратичного опору. Але на даний час для труб з однорідною зернистою шорсткістю розрахункова залежність коефіцієнта гідравлічного опору для цієї області відсутня.

При візуальному аналізі графіків, які характеризують залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса в межах доквадратичної області (рис. 1), очевидним є те, що між ними існує геометрична подібність. Це можна пояснюється тим, що технологія створення внутрішньої поверхні в цих трубах була однаковою. Вона в кожному випадку створювалась шляхом покриття її піском прийнятого діаметру [3]. При цьому в якості характеристики гладкості внутрішньої поверхні труб Й. Нікурадзе прийняв відношення геометричних величин r_0/k . З рисунка 1 видно, що відношення r_0/k й число Рейнольдса Re однозначно визначають форму і положення графіків $lg(100\lambda) = f(r_0/k, lg Re)$. При цьому необхідно зауважити, що дослідження Й. Нікурадзе

виконував на трубах різного діаметру і з різною середньою висотою виступів шорсткості k .

Всі графіки $lg(100\lambda) = f(r_0/k, lg Re)$ в області доквадратичного опору, окрім графіка з гладкістю труби $r_0/k = 15$, мають подібну форму й складаються з двох ділянок. Перша ділянка має увігнуту форму, а друга – випуклу. Початок кожного графіка відповідає стану потоку, при якому відбувається його перехід з гідравлічно-гладкого опору в доквадратичний.

При подальшому збільшенні числа Рейнольдса графік зростає й досягає свого максимального положення в точці з числом Рейнольдса $Re_{кв}$, яка відповідає переходу стану потоку з доквадратичного опору в квадратичний. Коефіцієнт гідравлічного опору $\lambda_{кв}$ при цьому стані потоку визначається в залежності від гладкості внутрішньої поверхні труби r_0/k за рівнянням Л. Прандтля

Для отримання загального методу кількісного врахування втрат напору в потоці реальної рідини на основі методу аналізу розмірностей, встановлено математичні залежності сил тертя на внутрішній поверхні стінки труби від основних діючих факторів, а саме шорсткості внутрішньої поверхні труби k/r_0 й ступеню турбулентності потоку, який визначається числом Рейнольдса. Результати дадуть змогу удосконалити залежності для практичних розрахунків трубопроводів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Хлапук М. М., Безусяк О. В., Волк Л. Р. та ін. Теоретичні дослідження коефіцієнта гідравлічного опору в гідравлічно гладких трубопроводах. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2020. Вип. 4(92). С. 23–36.
- [2] Волк Л. Р., Безусяк О. В. та ін. Удосконалення розрахунку закритої колекторно-дренажної мережі дренажних систем. *Меліорація і водне господарство*. 2021. Вип. 1. С. 98–106.
- [3] J. Nikuradse. Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Röhren. *Forsch. Arb. Ing. Wes.* 1932. Vol. 356. Pp. 1–36.
- [4] J. Nikuradse. Strömungsgesetze in rauchen Röhren. *Forsch. Ver. Dtsch. Ing.* 1933. Vol. 361. Pp. 1–63.
- [5] M. Khlapak, O. Bezusyak, L. Volk, and Z. Zhang. Theoretical research of friction factor in hydraulically smooth pipes. *Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters* (Kryvyi Rih, ICSF 2021). 2021. Vol. 280. Pp. 1–6.

Упровадження сучасних комп'ютерних та високо інформаційних технологій у проекти водогосподарсько-меліоративних об'єктів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.065>

Павло Волк

професор кафедри водної інженерії та водних технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
p.p.volk@nuwm.edu.ua

Анатолій Рокочинський

професор кафедри водної інженерії та водних технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua

Роман Коптюк

доцент кафедри водної інженерії та водних технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
r.m.koptyuk@nuwm.edu.ua

Євген Ромащенко

аспірант кафедри водної інженерії та водних технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
e.v.romashchenko@nuwm.edu.ua

Анотація—На сучасному етапі розвитку науки і техніки, що передбачає широке впровадження високоінформативних комп'ютерних технологій в усі сфери життя, інтенсивно використовуються системи автоматизованого проектування як універсальний технічний інструмент, який дає змогу удосконалювати практику проектування складних об'єктів і систем, насамперед природно-техногенного характеру, а також вирішувати цілу низку супутніх наукових та народногосподарських завдань.

Ключові слова—технології; проект; водогосподарсько-меліоративний об'єкт.

I. ВСТУП

Загострення найбільших викликів сучасності, що стосуються енергетичних, продовольчих та водних криз, під впливом зміни кліматичних та антропогенних чинників як на планетарному, так і регіональних рівнях, що обумовлює необхідність у зміні підходів до створення та функціонування водогосподарсько-меліоративних об'єктів на меліорованих землях, які адаптовані до цих змін [1; 2; 3].

Враховуючи складність проектування водогосподарсько-меліоративних об'єктів, як складних природно-технічних еколого-економічних систем, необхідно змінювати принципи проектування і розрахунку гідромеліоративних систем за комплексом оптимізаційних й прогнозно-імітаційних моделей, які враховують множинні природно-агро-меліоративні умови як в часі, так і в просторі.

Застосування такого підходу потребує відповідного всебічного аналізу абсолютно

різномірних за своєю природою режимних, технологічних та технічних аспектів водорегулювання осушуваних земель у їх взаємозв'язку, схематизації та параметризації природно-меліоративних умов їх реалізації через переважаючий стохастичний характер формування.

Тому слід переходити на просторову постановку та реалізацію вирішення такого роду завдань в цілому по об'єкту, що спирається на застосування сучасних інформаційних та комп'ютерних технологій, АСУ, САПР, ВІМ та ГІС-технологій. Останні поєднують спільне та взаємне використання даних.

II. МЕТОДИ ТА МАТЕРІАЛИ

Вирішення такої складної проблеми можливе тільки завдяки реалізації на практиці сучасної концепції розвитку меліорацій в зоні зрошення, а також достатнього і нестійкого зволоження. Ця концепція ґрунтується на застосуванні нових підходів і прогресивних технологій водорегулювання з метою оптимізації меліоративного режиму зрошуваних і осушуваних земель. Вона передбачає узгодження суперечливих вимог до водного режиму посівів вирощуваних сільськогосподарських культур і відповідного екологічного ефекту, створюваного при цьому.

У свою чергу, реалізація таких моделей оптимізації спирається на комплекс прогнозно-імітаційних моделей, які за відповідним видом прогнозу (довготерміновим чи короткотерміновим) дають змогу оцінювати множинні змінні умови досліджуваного об'єкта (клімат, ґрунти, рельєф, технології, режими та схеми водорегулювання, урожай вирощуваних культур тощо).

Необхідність розробки і впровадження прогнозно-оптимізаційних режимних розрахунків, методів і засобів їх реалізації зумовлені об'єктивним розвитком і потребами меліоративного виробництва, розвитком науково-технічного прогресу в галузі. Вони є необхідною передумовою для розробки елементів АСУ та САПР управління меліоративними і водогосподарськими об'єктами при їх експлуатації в зоні достатнього та нестійкого зволоження.

Але, при цьому, можливості постановки і розв'язування таких задач, зумовлених їх об'єктивною необхідністю, а також сучасним рівнем розвитку наукових ідей та методології їх втілення, не завжди узгоджуються між собою, перш за все через відсутність відповідних оптимізаційних і прогнозно-імітаційних моделей, методичного й інформаційного забезпечення їх реалізації, які б задовольняли умовам виробництва.

До цього слід додати, що, з іншого боку, не завжди на виробництві сьогодні мають місце необхідні передумови (кадри й рівень їх фахової підготовки, матеріально-технічне забезпечення тощо), які дозволяють сприйняти і реалізувати на практиці нові наукові ідеї та розробки.

III. РЕЗУЛЬТАТИ

Впродовж 90-х років минулого століття і по теперішній час за результатами наукових досліджень на кафедрі водної інженерії та водних технологій НУВГП було розроблено методичне, програмне та необхідне інформаційне забезпечення з реалізації комплексу оптимізаційних та прогнозно-імітаційних моделей з обґрунтування конструктивних та технологічних рішень з водорегулювання меліорованих земель, визначення їх економічної, екологічної та інвестиційної ефективності доведених до виробничого рівня їх використання у вигляді науково-методичних рекомендацій, галузевих нормативів тощо [3; 4].

На їх основі здійснюється розв'язання низки оптимізаційних та прогнозних задач з водорегулювання на меліорованих землях:

- оптимізація режимних, технологічних та технічних рішень та їх параметрів з водорегулювання на зрошуваних та осушуваних землях України у відповідних зонах їх розташування;
- обґрунтування вибору можливих способів регулювання водного режиму та відповідних до них типів й конструкцій гідромеліоративних систем;
- оптимізація параметрів регулюючої мережі;
- оптимізація розрахункової забезпеченості й параметрів магістральних каналів та регульованих водоприймачів;
- комплексна автоматизація планового водорегулювання на меліорованих землях;

- розробка системних планів водорегулювання на довготерміновій основі;
- створення інформаційно-дорадчих систем оперативного планування водорегулювання;
- реалізація планового водорегулювання у виробничих умовах;
- обґрунтування економічної й екологічної ефективності водогосподарсько-меліоративних заходів, а також визначення їх інвестиційної привабливості тощо.

Вони також широко запроваджуються нами у навчальний процес при читанні відповідних теоретичних курсів, курсовому, дипломному проектуванні, підготовці випускових магістерських робіт за освітньою програмою «Водна інженерія та водні технології» [5].

Дані науково-технічні розробки пройшли успішну апробацію й виявили достатню ефективність їх використання у виробничих умовах та навчальному процесі при підготовці відповідних фахівців в інших закладах вищої освіти України.

Отже, широке застосування сучасних оптимізаційних й інформаційних методів та моделей у проекти водогосподарсько-меліоративних об'єктів, а також у навчальний процес при вивченні таких дисциплін, як «САПР ВГО», «Основи САПР» «AutoCAD у водному господарстві», «Автоматизація проектування та розрахунків водогосподарсько-меліоративних об'єктів», буде сприяти істотному підвищенню рівня обґрунтованості розробки таких проектів на виробництві, підготовки здобувачів вищої освіти за освітньою програмою «Водна інженерія та водні технології» та матиме важливе значення для майбутньої їх практичної діяльності на виробництві у будівельних, проектних та науково-дослідних організаціях.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] A. Rokochynskiy, Y. Mazhayskiy, P. Volk, J. Yeznah, and A. Volchak et al. Necessity and ways to increase adaptive potential of dried land in changeable climatic conditions. *Engineering for rural development* (Jelgava, May 26-28, 2021) : 20th International Scientific Conference Proceedings. 2021. Vol. 20. Pp. 63–73. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF015.
- [2] Науково-методичні рекомендації щодо створення та функціонування дренажних систем у змінних сучасних умовах / за заг. Редакцією В. А. Сташука, А. М. Рокочинського, П. П. Волка. Рівне : НУВГП, 2021. 113 с.
- [3] A. Rokochinskiy, J. Jeznach, P. Volk, V. Turcheniuk, N. Frolenkova, and R. Koptiuk. Reclamation projects development improvement technology considering optimization of drained lands water regulation based on BIM. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*. 2019. Vol. 28(3). Pp. 432–443.
- [4] А. с. № 115481 від 27.10.2022 р. Програмний комплекс з обґрунтування проектних рішень при створенні та функціонуванні водогосподарсько-меліоративних об'єктів.
- [5] Рокочинський А. М., Турченко В. О., Волк П. П. та ін. Автоматизація проектування та розрахунків водогосподарсько-меліоративних об'єктів : навч. посіб. / за ред. проф. А. М. Рокочинського. Рівне : НУВГП, 2020, 257 с.

Дистанційне зондування Землі для оцінки ризиків втрати родючості сухостепових ґрунтів при водній кризі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.066>

Сергій Клімов

Навчально-науковий інститут енергетики,
автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
s.m.klimov@nuwm.edu.ua

Світлана Козішкурт

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики
та водного господарства
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
s.m.kozishkurt@nuwm.edu.ua

Анотація—Південна частина степової зони України (Сухий степ) знаходиться у складних природно-кліматичних умовах і збереження родючості ґрунтів без регулювання водно-повітряного режиму є неможливим. Причинами деградації ґрунтів є їхня природна засушливість, яка супроводжується нестачею опадів, високою температурою та засоленням кореневмісного горизонту. З метою встановлення ризиків втрати родючості сухостепових ґрунтів досліджено рівень водного стресу з використанням даних дистанційного зондування Землі, що актуально в умовах окупації частини території. Для оцінки обрано показники NDVI та NDMI. Аналіз показує, що на значній території досліджуваної групи полів існують передумови для деградації ґрунтів, що обумовлює необхідність відновлення зрошувальних меліорацій.

Ключові слова—Дистанційне зондування землі; вегетаційний індекс; індекс вологості; сухостепові ґрунти, водна криза; деградація; родючість; вологість ґрунту.

I. ВСТУП

Площа Сухого Степу України становить 1,8 млн га, з них рілля – 1,2 млн га (85%) [1]. В умовах посушливого клімату і близького залягання ґрунтових вод, збідненого трав'яного покриву утворилися сухостепові ґрунти з підвищеними запасами солей у верхніх шарах.

Потенційна родючість сухостепових ґрунтів обмежується недостатньою природною водозабезпеченістю, яка усувається штучним зрошенням. Тригація не лише забезпечує оптимальний водно-повітряний режим, але й управляє сольовим режимом у зоні аерації ґрунтів.

Російська федерація зумовила масштабну водну кризу у південно-степовій частині України. Підірвавши греблю Каховської ГЕС спричинила катастрофічні наслідки для економіки України, а особливо південних аграрних областей – найбільших споживачів водних ресурсів.

Застосування гідромеліоративних заходів на значних площах Сухого степу змінило такі природні

фактори ґрунтоутворення: природний водний баланс, вологість і температуру верхніх шарів ґрунту і приземного шару повітря, витрати води на випаровування, морфологічні ознаки та умови формування ґрунтів. Природно-автоморфні ґрунти трансформувалися в гідроморфні, що відобразилося на агрогідрологічних і хімічних властивостях меліорованих ґрунтів, формуванні кореневої системи та зміні умов живлення агрокультур [2].

У формуванні родючості ґрунту значну роль відіграють мікроорганізми. При вологості ґрунту 70% польової вологоємності створюється найбільш оптимальні умови для розмноження бактерій і грибів, що позитивно впливає на формування структури ґрунту, утворення гумусу і його мінералізації.

Крім забезпечення умов еволюції ґрунтів, вода необхідна для живлення, покриття витрат на транспірацію рослин і регулювання температурного режиму. Відсутність зрошення, збільшення температури та випаровування з полів при неглибокому заляганні мінералізованих ґрунтових вод активізує процеси вторинного засолення та втрати родючості.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для оцінки ризиків втрат родючості сухостепових ґрунтів при зумовленій водній кризі на фоні глобальних кліматичних змін доцільне застосування даних дистанційного зондування землі. Цей вид спостереження є досить інформативним та актуальним в умовах окупації територій російською федерацією.

До деградації ґрунтів призводять біологічні, фізичні, хімічні, екологічні фактори. Серед них: характер сільськогосподарського використання, кліматичні чинники (кількість опадів, температура і вологість повітря) та ін. Одним із показників наявності деградаційних процесів є кількість вологи у ґрунті.

Для виявлення змін в умовах вирощування сільськогосподарських культур обрано групу полів

Бехтерської та Чулаківської громад у Скадовському районі Херсонської області. Загальна площа полів становить 7276,9 га.

Ця група є репрезентативною для даного регіону, містить поля різної конфігурації, які зрошуються машинами колової та фронтальної дії.

Зрошувані ґрунти відрізнялися від богарних наявністю агроіригаційного горизонту, що забезпечував зменшення вмісту солей, збільшення запасів гумусу, покращення структури та підвищення родючості.

III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Для оцінки існуючих умов вирощування сільськогосподарських культур на зрошуваних землях було обрано кількісний показник кількості фотосинтетичної активної біомаси або вегетаційний індекс – Normalized Difference Vegetation Index, NDVI (Рис. 1, а – г), [5–8].

Для визначення показників водного стресу рослин на групі полів було проаналізовано річну зміну нормалізованого різницевого індексу вологості – Normalized Difference Moisture Index [5] (Рис. 1, д – к). NDMI дозволяє визначати рівень вмісту води в рослинах та рівень зволоженості ґрунтів і заснований на використанні комбінації спектральних діапазонів у ближньому інфрачервоному (NIR) та короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах [5; 10; 11]:

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR).$$

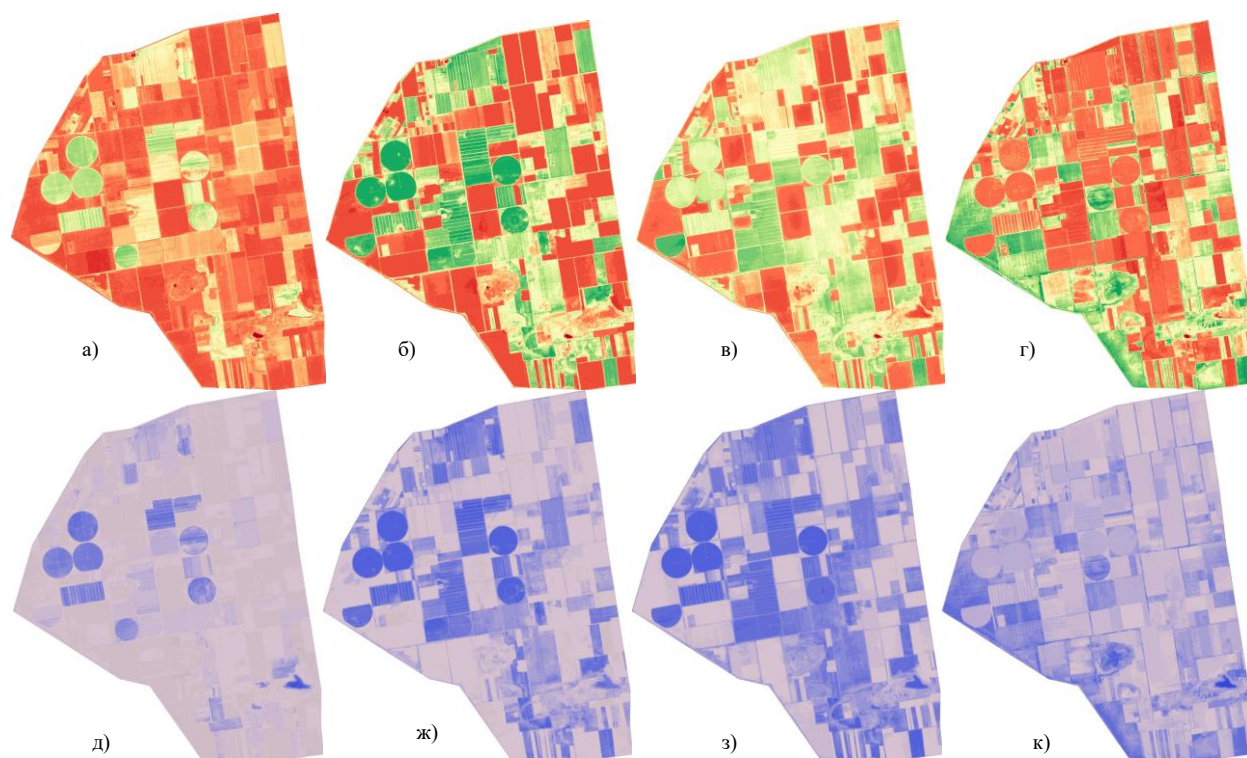


Рисунок 1. Мультиспектральні знімки групи полів: індекс NDVI (а – г); NDMI (д – к); а, д – 23.02.2022; б, ж – 24.04.2022; в, з – 09.05.2022; г, к – 03.07.2022 (за даними <https://crop-monitoring.eos.com/>)

Дана формула реалізується для різних супутників за доступними для них діапазонів: Sentinel-2: $NDMI = (B08 - B11) / (B08 + B11)$; Landsat 4-5 TM, Landsat 7 ETM+: $NDMI = (B04 - B05) / (B04 + B05)$; Landsat 8, 9: $NDMI = (B05 - B06) / (B05 + B06)$ [8].

Індекс вологості є відмінним індикатором нестачі води у посівах [5]. Дані каналу SWIR1 показують зміну вмісту води в рослинах, а канал NIR фіксує внутрішню структуру листя та вміст сухої речовини, але не вміст води. Тому поєднання NIR та SWIR дозволяє усунути зміни, викликані змінами внутрішньої структури листя та вмістом сухої речовини, підвищуючи точність у визначенні вмісту в рослинах води [12].

Аналіз даних знімків по групі полів показав, що більше 23% полів на початку вегетаційного періоду мали NDVI менше 0,2, це 1708 га на 23.02.2022 (Рис. 1, а) при $t_{max}=10^0$ C, $t_{min}=0^0$ C, Рис. 2), що свідчить про проблеми з виходом рослин на початок вегетації. У квітні полів із значенням індексу NDVI до 0,2 вже 31%, 2231 га на 24.04.2022, при $t_{max}=20^0$ C, $t_{min}=10^0$ C, (Рис. 2), табл. 1.

У середині вегетаційного періоду низькі значення індексу NDVI (менше 0,5) також можуть свідчити про проблеми з розвитком рослин. У травні таких полів було до 48%, 3499 га на 09.05.2022, в червні – до 47%, 3404 га на 13.05.2022, а в липні до 69% (4968 га на 03.07.2022 та 5020 га на 18.07.2022, Рис. 2).

Modeling, control and information technologies – 2023

TABLE I. РОЗПОДІЛ ГРУПИ ПОЛІВ ЗА ЗНАЧЕННЯМИ ІНДЕКСІВ HDVI ТА HDMI

NDVI	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
23/02/2022	5.81	1702.4	2699.7	1385.5	694.74	337.21	354.63	91.38	0.05	0
24/04/2022	4.75	2226.5	874.07	529.21	586.63	656.15	674.08	822.46	894.44	0.18
9/05/2022	1.08	591.27	2047.8	500.76	840.71	1413.4	1285.4	521.6	69.37	0
3/07/2022	6.55	1956.1	1846.08	768.39	756.06	673.44	582.76	440.13	88.17	0.03
NDMI	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
23/02/2022	0.08	0.2	48.87	4826.8	1674.5	314.22	366.72	36.04	4.2	0
24/04/2022	0	0	0.96	2856.4	1465.4	1103.5	1052.6	787.44	2.24	0
9/05/2022	0	0	0	1678.3	1585.1	1272.8	1682.5	1052.8	0.08	0
3/07/2022	0	0.01	0.3	799.8	3996.3	1484.5	797.54	183.72	9.96	0

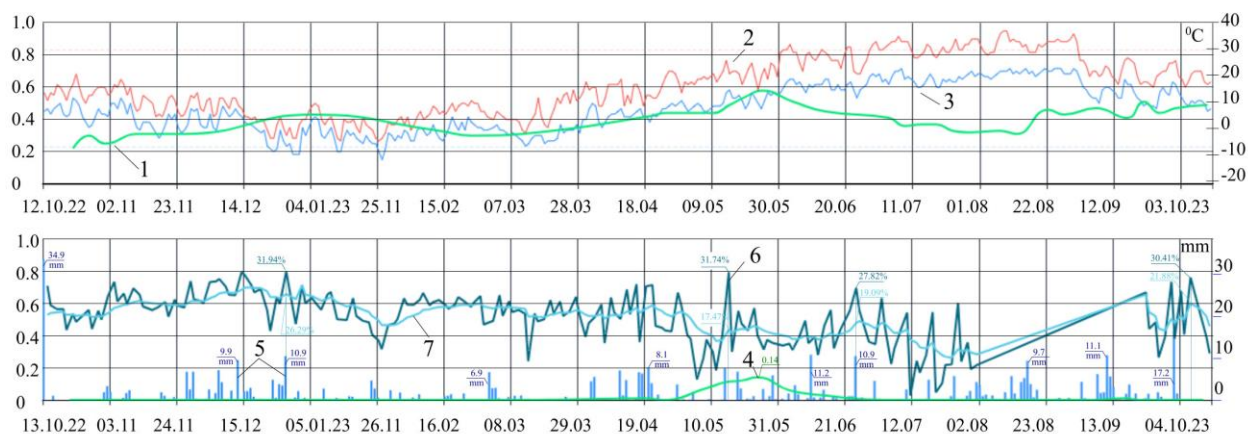


Рисунок 2. Зведений графік зміни індексів NDVI та NDMI на групі полів, 2022 рік: 1 – індекс NDVI; 2 – максимальна добова температура повітря, t_{max} , °C; 3 – мінімальна добова температура повітря, t_{min} , °C; 4 – індекс NDMI; 5 – опади, мм; 6 – вологість поверхневого шару ґрунту, %; 7 – вологість у кореневій зоні, %

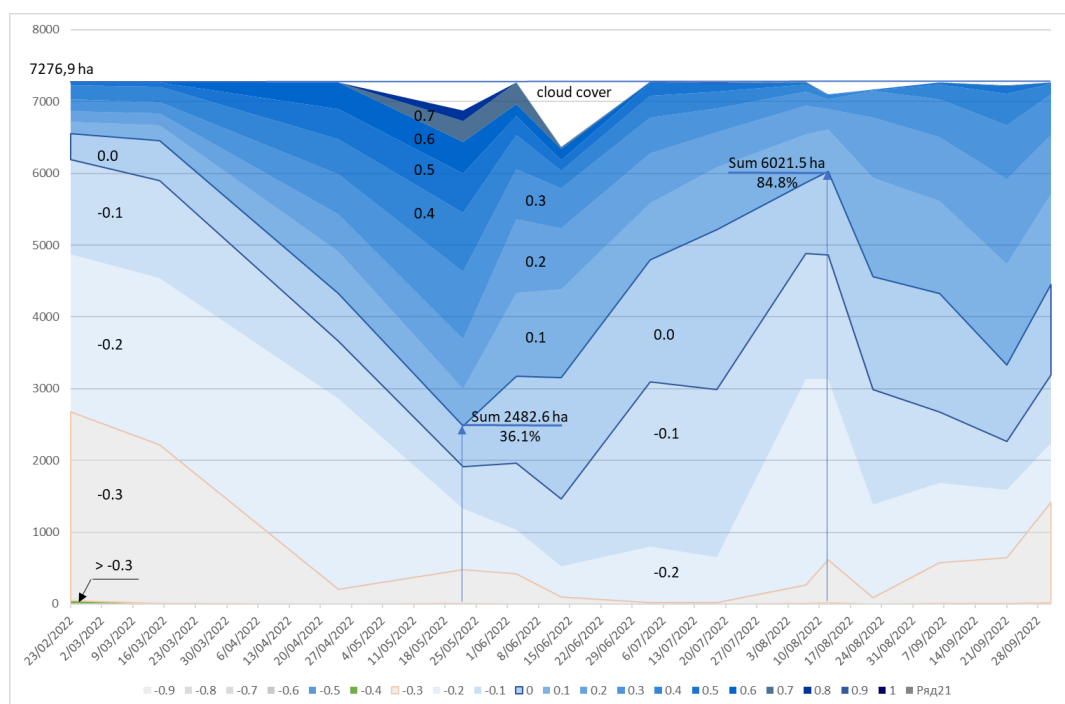


Рисунок 3. Розподіл площ на групі полів за величиною NDMI індексу, 2022 рік

Як видно з рис. 3 кількість полів зі значенням показника NDMI менше «-0,2», що вказує на критичну відсутність вологи при незначному рослинному покриві, досить значна (Рис. 4). У березні таких полів 62% (4544,4 га), у квітні – 39%

(2857,4 га). Однак із ростом рослин сумарний для групи полів індекс NDMI збільшується, і в травні кількість полів з індексом NDMI менше «-0,2» становить 23...18% (1678,3...1329,9 га), знижуючись до 7% (531 га) у червні.

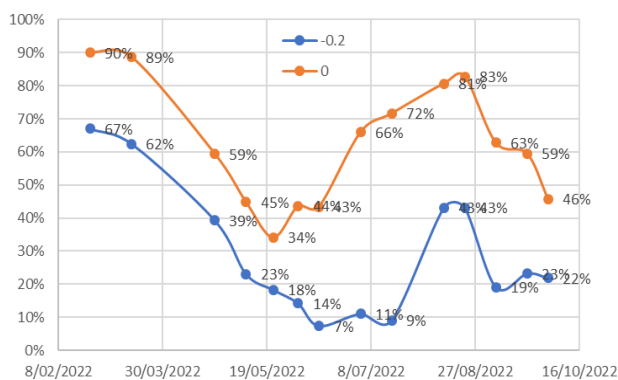


Рисунок 4. Зміна кількості полів із індексом NDMI менше «-0,2» та «0» для групи полів в 2022 році

IV. ВИСНОВКИ

Використання дистанційного зондування дозволило виявити потенційні ризики втрати родючості сухостепових ґрунтів при зумовленій російською федерацією водній кризі на фоні глобальних кліматичних змін. Низькі значення індексу NDVI для досліджуваної групи полів свідчать про проблеми з розвитком рослин. Показник NDMI суттєво менше, ніж має бути для нормальних ґрунтоутворюючих процесів. Цей аналіз показує, що ґрунти при відсутності зрошувальних меліорацій будуть деградувати. Із часом землі стануть непридатними для вирощування сільськогосподарських культур або використання їх як пасовищ.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Гудзь В. П. Землеробство. Київ : ЦУЛ, 2010. 464 с.

[2] Козішкурт М. С., Козішкурт С. М. Еволюція ґрунтів та шляхи збереження їх родючості при зрошуваному

землеробстві на півдні України. *Вісник УДУВГП*. Вип. 2(26). Рівне, 2004. С. 117–124.

- [3] Використання даних дистанційного зондування Землі для картування ґрунтів. [Online]. URL: <https://ua.sensefarming.com/vykorystannya-danyh-dystancijnogo-zonduvannya-dlya-kartuvannya-gruntiv/>. (Accessed: October 17, 2023).
- [4] Geospatial Data Analytics & Satellite Imagery By EOSDA.[Online]. URL: <https://eos.com/>. (Accessed: October 17, 2023).
- [5] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ.* 1974. Vol. 351(1). Pp. 309.
- [6] S. A. O'Shaughnessy, C. Rush. Precision Agriculture: Irrigation. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. K.V.A. Neal, Ed., Oxford : Academic Press, 2014. Pp. 521–535. doi: 10.1016/B978-0-444-52512-3.00235-7.
- [7] N. Katsoulas, A. Elvanidi, K. P. Ferentinos, M. Kacira, T. Bartzanas, and C. Kittas. Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review. *Biosyst. Eng.* 2016. Vol. 151. Pp. 374–398. doi: 10.1016/b978-444-52512-3.00235-7.
- [8] Normalized Difference Moisture Index | U.S. Geological Survey. [Online]. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-moisture-index>. (Accessed: October 17, 2023).
- [9] N. R. Falkenberg, G. Piccinini, J. T. Cothren, D. I. Leskovaar and C. M. Rush. Remote sensing of biotic and abiotic stress for irrigation management of cotton. *Agric. Water Manag.* 2007. Vol. 87(1). Pp. 23–31. doi: 10.1016/j.agwat.2006.05.021.
- [10] K. K. Bandyopadhyay et al. Characterization of water stress and prediction of yield of wheat using spectral indices under varied water sand nitrogen management practices. *Agric. Water Manag.* 2014. Vol. 146. Pp. 115–123, doi: 10.1016/j.agwat.2014.07.017.
- [11] M. Lubskyi, T. Orlenko, I. Piestova, A. Andreiev, and A. Lysenko. Evaluation of indicators for desertification risk assessment of Oleshky sands desertification based on Landsat data time series. *Ukr. J. Remote Sens.* 2023. Vol. 10(1). Pp. 17–28. doi: 10.36023/ujrs.2023.10.1.229.

Інноваційні підходи до керування та моніторингу систем біологічного очищення стічних вод

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.067>

Андрій Сафоник

Навчально-науковий інститут енергетики,
автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Сергій Полухович

Навчально-науковий інститут енергетики,
автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
s.o.polyukhovych@nuwm.edu.ua

Дмитро Ластовецький

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
d.o.lastovetskyi@nuwm.edu.ua

Анотація—Розглянуто сучасний стан досліджень та інноваційні підходи до керування та моніторингу систем біологічного очищення стічних вод. Визначено основні напрями досліджень у світовій науці та здійснено огляд методів керування, що базуються на системних аналізах, математичних моделях, інформаційних системах та алгоритмах керування. Запропоновано аспекти взаємодії системи моніторингу стану очищення стічних вод та системи керування, що допомагають забезпечити ефективне та надійне керування процесом очищення стічних вод.

Ключові слова—системи біологічного очищення стічних вод, керування, моніторинг, нелінійність, збурення, методи адаптивного керування оптимальним регулятором, нейромережеві системи, екологічна безпека.

І. ВСТУП

Промислові системи біологічного очищення стічних вод являють собою складну, багатокomпонентну та багатозв'язну біотехнічну систему, для забезпечення безпеки, надійності та ефективності якої необхідно здійснювати безперервний контроль стану. Найскладнішим і найменш вивченим з точки зору розробки модельно-алгоритмічного забезпечення та апаратно-програмної реалізації інформаційної системи біологічної очистки та підтримки прийняття рішень елементом є біореактор. Сучасні підходи до моніторингу та аналізу стану в аналізованій предметній галузі використовуються недостатньо. Основні аспекти керування та моніторингу систем біологічного очищення стічних вод [1]:

1. Ефективність очищення: основною метою систем біологічного очищення є видалення забруднень зі стічних вод. Моніторинг включає в себе перевірку рівня забруднень

перед і після очищення для визначення ефективності процесу.

2. Запобігання аваріям: збій в системі біологічного очищення може призвести до викиду неочищених стічних вод. Моніторинг стану обладнання та автоматичне виявлення аномалій допомагають запобігти аваріям.
3. Мінімізація збитків від екологічних контамінацій: у випадку аварій або неправильної роботи системи, моніторинг може допомогти швидко виявити проблеми і вжити заходів для мінімізації збитків для довкілля.
4. Скорочення часу реакції на аварійні ситуації: автоматичні системи моніторингу та керування дозволяють реагувати на аварійні ситуації швидко і ефективно, зменшуючи потенційні наслідки для навколишнього середовища.
5. Оптимізація процесу очищення: сучасні технології дозволяють оптимізувати процес біологічного очищення шляхом аналізу даних і регулювання параметрів, таких як температура, рівень кисню та інші.

Методи досліджень у контексті керування процесами біологічної очистки включають в себе:

1. Математичне моделювання: використання математичних моделей для прогнозування роботи системи та оптимізації процесу.
2. Використання сучасних сенсорів та аналіз даних: збір даних про різні параметри системи (температура, рівень кисню, рівень забруднень) за допомогою сенсорів та їх аналіз для виявлення аномалій та вдосконалення керування.
3. Автоматизація інтегрованих систем керування і моніторингу: сполучення систем

моніторингу і керування для автоматичного регулювання процесу очищення.

4. Використання інтелектуальних алгоритмів: застосування штучного інтелекту та машинного навчання для покращення точності та швидкості процесу моніторингу та керування.

Усі ці методи допомагають підвищити ефективність біологічного очищення стічних вод, знизити негативний вплив на довкілля та забезпечити відповідність нормам якості досліджуваного об'єкту.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Внаслідок складності об'єкта дослідження, відсутність загальної методології системного аналізу, оцінки стану та керування складними технічними системами, включаючи біологічні очисні споруди, було створено велику кількість методів управління, заснованих на нелінійних різницевих або диференціальних рівняннях [1–2]. Деякі з цих методів включають:

1. Використання принципу максимуму Понтрягіна для синтезу оптимального керування за температурою.
2. Використання релейного керування зі зворотним мультиплікатором для моделі Лотки-Вольтерра з метою впливу на зміну чисельності популяцій.
3. Оптимальне керування зміною кількості включених повітрорудок для подачі кисню в коридорному реакторі.
4. ПІ-регулювання та порівняння з алгоритмом Nonlinear Model Predictive Control (NMPC).
5. Нелінійне спостережувальне NMPC-керування, яке вимагає лінеаризації моделі об'єкта на кожному кроці оптимізації.
6. NMPC-керування для лінеаризованої моделі об'єкта.
7. Двоконтурне керування киснем і нітратами щодо витрати повітря та мулової суміші у зворотному потоці, не враховуючи можливий взаємозв'язок між керованими параметрами.
8. Умови стійкості за Ляпуновим для деяких біохімічних моделей.
9. Ковзні режими швидкості розчинення для регулювання концентрації субстрату.
10. Керування процесом біоочищення з одночасним спостереженням стану.

Ці методи використовуються для вирішення задач керування біохімічними системами в біологічних очисних спорудах.

Складні системи біологічного очищення стічних вод представляють собою високо нелінійні та динамічні процеси, що піддаються збуренням і мають велику кількість параметрів. Для ефективного керування такими системами необхідно враховувати їх складність та особливості. Основні положення існуючих підходів до керування складними системами біологічного очищення можна розглянути так:

- Класичні методи оптимального керування: ці методи часто ґрунтуються на лінеаризації системи, що дозволяє застосовувати

класичні алгоритми керування, такі як PID-регулятори. Однак ці методи ефективні лише для лінеаризованих об'єктів, та не завжди можуть враховувати всі нелінійні та некеровані аспекти біологічної очистки.

- Нелінійний характер систем біологічного очищення: біологічні очисні споруди мають нелінійний опис, а це означає, що зміни в одному параметрі можуть мати нелінійний інтерактивний ефект на інші параметри системи. Також системи піддаються збуренням від змін зовнішнього середовища.
- Відсутність універсальних підходів до керування: складність реалізації та нефізичність результатів лінеаризації часто призводять до відсутності універсальних підходів до керування біологічними очисними системами. Це включає в себе питання про адаптивність керування до змінних умов і потреб системи.
- Мотивація застосування методів адаптивного керування: методи адаптивного керування та оптимального регулятора можуть допомогти вирішити ці проблеми. Вони дозволяють створювати системи керування, які забезпечують ефективність, точність та стійкість до змін умов. Адаптивні методи дозволяють системі самостійно адаптуватися до змін у процесі очищення, що робить їх ефективними в реальному часі.
- Аналітичний конструювання векторного регулятора: використання адаптивних методів дозволяє аналітично конструювати векторні регулятори, які можуть оптимізувати багато параметрів системи одночасно, що підвищує ефективність та точність керування.

Враховуючи усі ці аспекти, методи адаптивного керування та нелінійної адаптації виявляються перспективними для застосування в системах біологічного очищення стічних вод, оскільки вони дозволяють враховувати складність та нелінійність цих систем та забезпечують оптимальні результати в умовах змінних параметрів та збурень.

III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

До основних найбільш ідейно близьких досліджень слід віднести приклади синтезу безперервних нелінійних регуляторів на основі керування в ковзному режимі та на базі адаптивного керування оптимальним регулятором, однак отриманих в умовах повного опису в просторі станів для часткових процесів, істотно відмінних від моделі біореактора (за складністю математичного опису) [2].

Задача синтезу системи керування у просторі станів для динамічного об'єкта виду (Рисунок 1), функціонуючого за умов невизначеностей, на характер яких впливає і неповнота опису, і наявність внутрішніх та зовнішніх збурень має наступний вигляд:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, P, \zeta, t) + u, \hat{x} = h(x),$$

$$u = u(\psi, \hat{x}), \psi = \psi(\hat{x}), \dim(u) = \dim(\psi) = m < n,$$

де \hat{x} – вектор оцінки стану, $h()$ – функція отримана на основі вимірюваних змінних (спостерігач стану), $\psi(\hat{x})$ – цільова макрозмінна, умова $\psi(\hat{x}(t)) = 0, t \rightarrow \infty$ визначає так званий цільовий макростан (різноманітність або інваріант системи у разі його аттрактивних властивостей) для об'єкта керування

$\frac{dx}{dt} = f(x, P, \zeta, t) + u; u$ – керування, конструкція якого має забезпечувати асимптотичну стійкість системи керування (1) загалом із заданим часом перехідних процесів у ній.



Рисунок 1. Структурна схема системи адаптивного керування

Керування системою біологічної очистки стічних вод, яка є складним об'єктом, охоплює багато важливих аспектів та завдань для забезпечення ефективного та надійного функціонування такої системи.

1. Запобігання передаварійним або аварійним станам:
 - Коригування технологічного процесу: це включає в себе внесення змін у хід технологічного процесу для уникнення несприятливих умов.
 - Увімкнення резервних потужностей: в разі виникнення несподіваних ситуацій, таких як відмова основного обладнання, резервні ресурси або обладнання можуть бути автоматично увімкнені для підтримки процесу очищення без перерви.
 - Технічне обслуговування та ремонт обладнання: регулярне технічне обслуговування та надання ремонтних послуг дозволяють забезпечити нормальну роботу обладнання та мінімізувати ризик відмови.
2. Цілеспрямована зміна стану $x(t)$ для досягнення заданих характеристик цільової системи:
 - Зміна керуючих параметрів: включає в себе активний вплив на різні параметри об'єкта, такі як температура, витрата стічної води, концентрація субстрату та додавання реагентів. Зміни в цих параметрах можуть бути виконані в реальному часі для досягнення певних показників якості очищення.
 - Моніторинг і зворотний зв'язок: важливо встановлювати датчики та системи моніторингу, які можуть надавати інформацію про стан системи в реальному часі. За результатами моніторингу виконуються коригуючі дії, такі як

- зміна керуючих параметрів, щоб забезпечити оптимальну ефективність системи.
- (1) Цілеспрямоване керування системою біологічної очистки стічних вод вимагає глибокого розуміння процесів та параметрів, що впливають на якість очищення. Для досягнення цієї мети використовуються різноманітні методи керування, а також сучасні технології моніторингу та збору даних [3; 4].

ВИСНОВКИ

Виходячи із основних аспектів керування та моніторингу систем біологічного очищення стічних вод було отримано наступні висновки:

1. Системи біологічного очищення стічних вод є складними технічними об'єктами, які піддаються впливу різноманітних зовнішніх та внутрішніх збурень. Їх нелінійність та складність робить застосування класичних методів керування обмеженим.
 2. Системи моніторингу стану біологічного очищення стічних вод відіграють важливу роль у виявленні аномалій та забезпеченні ефективного керування. Вони дозволяють оперативно реагувати на зміни в параметрах процесу та запобігати аваріям.
 3. Викликами у керуванні та моніторингу системи біологічного очищення стічних вод є нелінійність процесу та наявність збурень. Ці фактори ускладнюють застосування класичних методів керування та вимагають інноваційних підходів.
 4. Інноваційні методи, такі як методи адаптивного керування оптимальним регулятором та використання нейромережевих систем, можуть допомогти вирішити зазначені проблеми. Вони забезпечують більшу стійкість та точність управління нелінійними системами біологічного очищення стічних вод.
 5. Застосування інноваційних підходів до керування та моніторингу очищення стічних вод може покращити якість очищення та зменшити вплив зовнішніх збурень на роботу системи.
- У майбутньому, дослідження та розробка інноваційних методів керування та моніторингу системи біологічного очищення стічних вод залишається актуальною задачею для покращення ефективності та стійкості цих систем у вирішенні важливих екологічних завдань.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] S. I. Kolesnikova. Synthesis of the control system for a second order non-linear object with an incomplete description. *Automation and Remote Control*. 2018. Vol. 79(9). Pp. 1556–1566.
- [2] P. Kazemi, C. Bengoa, J.-P. Steyer, and J. Giralt. Data-driven techniques for fault detection in anaerobic digestion process. *Process Safety And Environmental Protection*. 2021. Vol. 146. Pp. 905–915.
- [3] Сафоник А. П. Комп'ютерне моделювання процесу біологічного очищення води у регенераторі аеротенка. *Вісник Національного університету водного господарства і природокористування. Технічні науки* : зб. наук. пр. Рівне : НУВГП, 2014. Вип. 2(66). С. 114–122.
- [4] Сафоник А. П. Комп'ютерне моделювання та автоматизація процесу фільтрування та регенерації в магнітному фільтрі. *Вісник Інженерної академії України*. 2015. Вип. 1. С. 202–208.

Економіко-математичне моделювання динамічних процесів при запровадженні проектних рішень на Придунайських рисових системах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.068>

Василь Турченко

Кафедра водної інженерії та водних технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
v.o.turchenuk@nuwm.edu.ua

Анатолій Рокочинський

Кафедра водної інженерії та водних технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua

Наталія Приходько

Кафедра водної інженерії та водних технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
n.v.prihodko@nuwm.edu.ua

Павло Волк

Кафедра водної інженерії та водних технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
p.p.volk@nuwm.edu.ua

Орест Тимейчук

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
o.v.tymeichuk@nuwm.edu.ua

Анотація — Сформульовані підходи до вибору складу та черговості запровадження комплексу розроблених режимних, технологічних та технічних заходів з підвищення ефективності функціонування Придунайських РЗС. Виконано оцінювання економічної ефективності запропонованого комплексу заходів та інвестиційна оцінка черговості впровадження варіантів проектних рішень. На підставі застосування динамічного програмування розроблено науковий підхід та обґрунтовано оптимальний склад заходів і черговість їх реалізації в процесі реконструкції діючих РЗС.

Ключові слова—рисова зрошувальна система; метод динамічного програмування; принцип оптимальності Беллмана, економічна ефективність.

I. ВСТУП

Сталий розвиток зрошувальних меліорацій, як одного з найважливіших факторів інтенсифікації сільськогосподарського виробництва та невід’ємної складової продовольчого і ресурсного забезпечення населення, потребує раціонального та ефективного використання водних й енергетичних ресурсів і, одночасно, забезпечення екологічної стійкості природних ландшафтів та територій.

Водночас, одним зі стратегічно важливих і актуальних завдань розвитку агропромисловості на

сучасному етапі є відновлення продуктивності та ресурсного потенціалу галузі рисівництва на підставі підвищення ефективності водо- та енергокористування й поліпшення загального еколого-меліоративного стану наявних рисових зрошувальних систем (РЗС).

Комплексність і надзвичайна складність вирішення проблеми підвищення загальної ефективності функціонування РЗС визначають необхідність запровадження ефективних методів управління їх меліоративним станом з урахуванням сучасних технічних, технологічних, екологічних й економічних вимог до їх функціонування на підставі подальшого розвитку теорії оптимізації щодо водо- та енергокористування, методів і засобів їх реалізації.

На підставі системної оптимізації обґрунтовано комплекс різномірних але взаємопов’язаних режимно-технологічних та конструктивних заходів з підвищення ефективності функціонування РЗС, які спрямовані на удосконалення технології водорегулювання, підвищення дренажності та рівномірності фільтрації за площею та профілем карти-чека на підставі глибокого розпушення; повторне використання дренажно-скидних вод (ДСВ), промивку засолених ґрунтів на фоні глибокого

розпушення, удосконалення конструкції дренажно-скидної мережі [1–5].

Метою роботи є оптимізація складу та черговості запровадження комплексу розроблених режимних, технологічних та технічних заходів з підвищення ефективності функціонування Придунайських РЗС.

II. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На кінцевому етапі проведеного комплексу оптимізаційних розрахунків режимних, технологічних та конструктивних рішень щодо підвищення ефективності функціонування РЗС ми зустрічаємось з випадком, коли метою (ціллю) оптимізації є встановлення найкращої послідовності тих чи інших робіт пов'язаних з впровадженням запланованих заходів, оскільки проведення капітальної реконструкції РЗС вимагає значних капіталовкладень. При обмежених інвестиційних можливостях постає питання поетапної реконструкції, встановлення пріоритетів для першочергового фінансування з точки зору оптимальної економічної доцільності. Такі економічні задачі, де одним з факторів є час можна розв'язати методами динамічного програмування.

Основними особливостями розв'язання економічних задач з використанням методів динамічного моделювання є такі: не існує загальної постановки задач; не існує єдиного алгоритму розв'язку; основою кожної динамічної моделі є функціональне рівняння; для кожної задачі функціональні рівняння виводяться індивідуально; всі функціональні рівняння базуються на принципі оптимальності Беллмана [6; 7].

Загальна постановка задачі динамічного програмування полягає в наступному: нехай деяка керована система знаходиться в початковому стані S (керована – означає, що можна керувати процесом який відбувається в системі, а спосіб впливу на неї – управління U). Завдяки здійсненню певного управління U вказана система переходить з початкового стану в кінцевий. З процесом зміни стану системи пов'язаний деякий числовий критерій W (функція). Отже мета керуючої сторони полягає в пошуку такого можливого управління U , яке надало б максимального значення функції $W=W(U)$.

Основу методу динамічного програмування визначає принцип оптимальності Беллмана [6–9], при якому оптимальне продовження процесу визначається відносно стану, який досягнуто на даний момент. Основна умова того, щоб цей принцип здійснювався така: процес управління повинен бути без зворотнього зв'язку, тобто керування на даному кроці не повинно впливати на попередні кроки.

Основне функціональне рівняння Беллмана можна записати у такому вигляді:

$$F_{n-k}(X^k) = \max_{u_{k+1}} \left[W_{k+1}(X^{(k)}, u_{k+1}) + F_{n-k}(X_n^{(k+1)}) \right],$$

$$k = \overline{0, n-1}.$$

де $X^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ – є сукупністю чисел, що визначають стан системи S на k -му кроці і отримані в результаті керування U_k , яке забезпечує перехід системи S із стану $X^{(k-1)}$ в $X^{(k)}$; $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ – оптимальна стратегія керування; $F_{n-k}(X_n^{(k)})$ – це прибуток, який отримується при переході будь-якого стану $X^{(k)}$ в кінцевий стан $X^{(n)}$ при реалізації оптимальної стратегії керування на решті $(n-k)$ кроках.

Процедура побудови оптимального управління методом динамічного програмування розпадається на дві стадії: попередню та остаточну. Як відомо, в кожному процесі є останній крок, на якому прийняті рішення не залежать від майбутнього. Тому на цьому кроці вибирають керування, яке дозволяє отримати найбільший ефект. Спланувавши цей крок, до нього приєднуємо попередній, до якого в свою чергу приєднуємо попередній і т. д. до початкового стану. Щоб спланувати останній крок, потрібно знати стан системи на попередньому кроці. Якщо ж він невідомий, то роблять різноманітні припущення, про можливі стани системи на цьому кроці. Для кожного припущення вибирають оптимальні керування на попередньому кроці. Таке оптимальне керування називається умовно оптимальним. Тобто, попередня оптимізація проводиться за кроками у зворотньому порядку (від кінця до початку), а остаточна оптимізація по кроках від початку до кінця.

III. РЕЗУЛЬТАТИ

Задача оптимального розподілу ресурсів за варіантами проектних рішень щодо запровадження комплексу технологічних та конструктивних заходів щодо підвищення ефективності функціонування РЗС на стадії їх експлуатації розглядалась за умови отримання максимального загального прибутку.

При цьому нами розглядалось шість наступних варіантів проектних рішень із обґрунтованого комплексу заходів:

- **варіант 1** – перехід на запровадження ресурсозберігаючого режиму зрошення рису із обґрунтованою зрошувальною нормою $M=18000 \text{ м}^3/\text{га}$;
- **варіант 2** – використання ДСВ для зрошення рису та супутніх культур з їх розбавленням в співвідношенні 1:1;
- **варіант 3** – використання ДСВ для зрошення рису та супутніх культур з їх розбавленням в співвідношенні 1:2;
- **варіант 4** – проведення розпушення ґрунту на глибину 0,6 м без реконструкції рисових карт;
- **варіант 5** – проведення дооснащення відкритої дренажно-скидної мережі закритими дренами-колекторами з $B=100 \text{ м}$ в поєднанні з розпушенням ґрунту та влаштуванням приукісного дренажу;

- **варіант 6** – проведення реконструкції карт-чеків шляхом ліквідації картових дренажно-сکیدних каналів з проведенням поливу рису та супутніх культур дощуванням.

Результати динамічного програмування щодо вибору найкращого поєднання варіантів приведені в таблиці 1.

ТАБЛИЦЯ 1. Оптимізація розподілу ресурсів між варіантами проектних рішень

Показники	Варіанти проектних рішень						Усього
	3	2	4	1	6	5	
Необхідні затрати, грн/га	100	200	800	2000	3000	13000	19100
Прибуток, грн/га	600	700	4000	15000	2000	22000	44300
0	0	0	0	0	0	0	
100	600	0	0	0	0	0	
200	600	700	0	0	0	0	
300	600	1300	0	0	0	0	
800	600	1300	4000	0	0	0	
900	600	1300	4600	0	0	0	
1000	600	1300	4700	0	0	0	
2000	600	1300	5300	15000	0	0	
2100	600	1300	5300	15600	0	0	
2300	600	1300	5300	16300	0	0	
3000	600	1300	5300	16300	2000	0	
3100	600	1300	5300	16300	2600	0	
3300	600	1300	5300	16300	3300	0	
3900	600	1300	5300	16300	6600	0	
4000	600	1300	5300	16300	6700	0	
5900	600	1300	5300	16300	17000	0	
13000	600	1300	5300	16300	17000	22000	
13100	600	1300	5300	16300	17000	22600	
13300	600	1300	5300	16300	17000	23300	
15000	600	1300	5300	16300	17000	37000	
Реальні витрати				2000		13000	15000
Залишок				0		2000	
Прибуток, грн/га				15000		22000	37000

Розрахунки показали, що загальні затрати на повну реконструкцію Придунайських РЗС, яка включає запровадження ресурсозберігаючої технології водокористування з комплексом заходів на підвищення ефективності їх функціонування з проведенням модернізації насосних станцій та заміни і ремонту гідротехнічних споруд будуть становити 70–80 тис. грн/га. Як показали результати моделювання, найкращим рішенням щодо вкладання ресурсів на Придунайські РЗС є першочергове запровадження на них ресурсозберігаючої технології зрошення рису, в поєднанні з реконструкцією карт-чеків. Її суть зводиться до дооснащення існуючої дренажно-сکیدної мережі закритими дренами-колекторами, проведенням глибокого розпушення ґрунту та влаштування приукісного дренажу для захисту дренажно-сکیدних каналів від руйнування їх русла, що потребує на її реалізацію 15–20 тис. грн/га. Друга черга реконструкції – це реконструкція насосних станцій, яка за укрупненими показниками в розрахунку на 1 га площі рисової системи буде становити біля 20 тис. грн/га. І третя черга – це реконструкція гідротехнічних споруд на зрошувальній і дренажно-сکیدній мережі, яка потребує найбільших капіталовкладень – понад 35 тис. грн/га. Проводиться вона в останню чергу, аби окупились інвестиції попередніх етапів реконструкції. Залежно від фінансування, повні затрати на

реконструкцію Придунайських РЗС можуть окупитись за 9–12 років.

IV. ВИСНОВКИ

На основі застосування методу динамічного програмування розроблено науковий підхід та обґрунтовано оптимальний склад заходів та черговості їх реалізації при реконструкції діючих РЗС.

На прикладі Придунайських РЗС встановлено, що загальні затрати на їх повну реконструкцію, яка включає запровадження ресурсозберігаючої технології водокористування з комплексом заходів на підвищення ефективності їх функціонування з проведенням модернізації насосних станцій та заміни і ремонту гідротехнічних споруд будуть становити 70–80 тис. грн/га. При цьому, найкращим рішенням є першочергове запровадження на них ресурсозберігаючої технології зрошення рису в поєднанні з реконструкцією карт-чеків з дооснащення їх відкритої дренажно-сکیدної мережі закритими дренами, проведенням глибокого розпушення ґрунту та влаштування приукісного дренажу для захисту дренажно-сکیدних каналів від руйнування їх русла, яка потребує на її реалізацію 15–20 тис. грн/га. Друга черга реконструкції – це реконструкція насосних станцій, яка за укрупненими показниками в розрахунку на 1 га площі рисової системи буде становити близько 20 тис. грн/га. І третя черга – це реконструкція гідротехнічних споруд на зрошувальній і дренажно-сکیدній мережі, яка потребує найбільших капіталовкладень – понад 35 тис. грн/га. Проводиться вона в останню чергу, аби окупились інвестиції попередніх етапів реконструкції.

Так, залежно від фінансування та досягненні сукупного дисконтованого доходу 70–90 тис. грн/га, повні затрати на реконструкцію Придунайських РЗС можуть окупитись за 9–12 років.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] В. О. Турченко, А. М. Рокочинський. Оптимізація природно-меліоративного режиму рисових зрошувальних систем на еколого-економічних засадах. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. 2014. Вип. 2(66). С. 3–9.
- [2] В. О. Турченко, Н. А. Фроленкова, А. М. Рокочинський. Системна оптимізація водо-та енергокористування на рисових зрошувальних систем на еколого-економічних засадах. *Меліорація і водне господарство*. 2017. Вип. 106. С. 22–27.
- [3] V. Turchenyuk, N. Frolenkova and A. Rokochynskiy. Environmental and economic foundations of system optimization of operational, technological and construction parameters of rice irrigation systems. *Environmental Economics*. 2017. Vol. 8 (2). P. 76–82.
- [4] В. А. Сташук, А. М. Рокочинський, П. І. Мендусь, В. О. Турченко та ін. Рис Придунай'я. Херсон : Грінь Д.С., 2016.
- [5] В. А. Сташук, Р. А. Вожегова, А. М. Рокочинський та ін. Рисові зрошувальні системи України: підвищення ефективності їх функціонування. Київ-Херсон-Рівне : НУВГП, 2023.
- [6] Бугір М. К. Математика для економістів. Лінійна алгебра, лінійні моделі. К. : Академія, 1998.
- [7] Гетманцев В. Д. Лінійна алгебра і лінійне програмування. К. : Либідь, 2001.
- [8] Зайченко Ю. П. Дослідження операцій. К. : ЗАТ "ВПОЛ", 2000.
- [9] Кутковецький В. Я. Дослідження операцій. Миколаїв : Вид-во МДГУ ім. П. Могилы, 2003.

Тенденції розвитку гідроакумуючої енергетики у світі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.069>

Микола Хлапук

Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
m.m.khlapuk@nuwm.edu.ua

Юрій Філіпович

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та
гідравлічних машин
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
y.y.filipovych@nuwm.edu.ua

Назарій Стельмах

Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
n.o.stelmakh@nuwm.edu.ua

Особливе місце в числі різних видів гідроенергетики займають гідроакумуючі електростанції (ГАЕС). Завдяки специфічній технології ГАЕС дають унікальну можливість подвійного регулювання потужності – в турбінному (генераторному) і насосному режимах. Це дозволяє використовувати ГАЕС при вирішенні широкого діапазону режимних завдань, пов'язаних з потребами в регулюванні: регулювання добового графіка навантаження, напруги і частоти; регулювання режимів «теплових» ізольованих енергосистем; оптимізація роботи теплових (ТЕС) і атомних (АЕС) електростанцій, поліпшення їх техніко-економічних показників, зниження шкідливих викидів в атмосферу; спільна робота з припливними ПЕС; здійснення функцій швидкого аварійного резерву генеруючої потужності. З досвіду зарубіжних енергосистем, ГАЕС доцільно розміщувати в центрах енергоспоживання у промислових і урбанізованих районах країни, або поруч з неманеврним потужним джерелом електроенергії [1]. Але цим діапазон можливостей їх використання не обмежується. Залежно від варіанту розміщення ГАЕС можуть бути реалізовані певні специфічні переваги, особливо в аварійних і після аварійних ситуаціях.

Таким чином, технічна необхідність розвитку такого виду гідроенергетики як гідроакумування не викликає сумнівів, оскільки ГАЕС дозволяють оптимізувати роботу ТЕС, АЕС і енергомереж в цілому, забезпечити нормативну якість електроенергії в нормальних режимах, підвищити надійність і довговічність енергомереж, а також - в ряді випадків - радіаційну безпеку АЕС в аварійних ситуаціях, полегшити умови післяаварійного відновлення енергосистем в разі великої системної аварії, що супроводжується поділом системи і «посадкою» теплових станцій на «нуль», а також виконати позитивний вплив на загальногосподарські процеси країни: зменшити наслідки повеней,

створити запаси води для іригації, господарського та побутового споживання тощо. Ці технологічні можливості ГАЕС носять більше якісний характер, ніж кількісний, і їх важко оцінити економічно.

Вигода, яку може запропонувати гідроакумуюча енергетика, полягає у тому, що її значення зростає, оскільки енергетичні системи прагнуть до екологічно чистих форм виробництва електроенергії. Гідроакумуюча енергетика відповідно приваблює значні світові інвестиції.

Зрозуміло, що вигоди від гідроакумуючої енергетики в рамках регулювання напруги та частоти мережі та можливостей резервної потужності роблять технологію дуже привабливою, особливо з огляду на зростаючий вплив непостійної потужності, що видається від відновлюваних джерел, таких як вітер та сонце.

У Європі розробляються проекти об'єктів гідроакумування, що включають будівництво нових ГАЕС, модернізацію та заміну електромеханічного обладнання та реконструкцію будівель.

За даними Міжнародної гідроенергетичної асоціації (МГА), у Європі та й, власне, у світі в цілому активно просуваються проекти, що включають будівництво нових ГАЕС, модернізацію та заміну електромеханічного обладнання і реконструкцію будівель вже працюючих електростанцій.

Так, наприклад, у Німеччині ГАЕС мають комбіновану потужність близько 7 ГВт, але останнє дослідження, здійснене Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Аахенського університету та Voith, показали можливість довести потужність до 24 ГВт завдяки новим гідроакумуючим потужностям у землях Баден-Вюртемберг та Тюрінгія.

У сусідній Австрії будується нова ГАЕС потужністю 940 МВт. Так, станція поблизу населеного пункту Коральм включатиме верхню та нижню водойми, підвідний канал, напірний тунель і відвідний канал, вирівнювальний резервуар, підземну будівлю ГАЕС та підвідний тунель, лінії передач і трансформаторну підстанцію. Станція матиме напір близько 650 метрів та після завершення будівництва стане найбільшою гідравлічною електростанцією в Австрії.

У Північній Америці готується значна кількість проєктів із створення додаткових гідроакмулюючих потужностей. Наприклад, нещодавно GB Energy Park LLC та Alstom анонсували договір на постачання обладнання для проєкту Gordon Butte потужністю 400 МВт. Замкнена гідроакмулююча потужність у південно-центральної частині штату Монтана повинна складатися з верхньої та нижньої водойм, зв'язаних підводною бетонною шахтою із сталевим облицюванням. У будівлі ГАЕС планується встановити чотири турбонасоси загальною потужністю 400 МВт та очікуваним виробництвом електроенергії 1300 ГВт/год на рік.

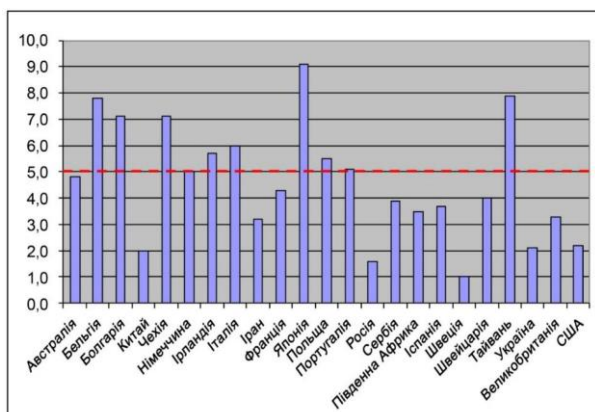


Рисунок 1. Частка вироблення електроенергії гідроакмулюючими станціями в енергосистемі країн

Крім того, United Power Corp зареєстрували заявку на дослідження розробки проєкту ГАЕС потужністю 30 МВт на південному березі острова Мауї (Гаваї). Цей проєкт буде використовувати морську воду з Тихого океану. Запропонований проєкт матиме верхню водойму, що складатиметься з чотирьох акумулюючих резервуарів і будівлі ГАЕС, яка включатиме три насоси змінної швидкості по 10 МВт, та дві турбіни-генератори типу "Пелтон" із змінною швидкістю по 15 МВт. Оцінене річне виробництво енергії – 5,2 ГВт/год.

В останній розробці філія Eagle Crest Energy погодила придбання шахти Kaiser Eagle Mountain поряд із Дезерт-Центр (Каліфорнія) для створення нової ГАЕС з двох із порожніх шурфів колишньої шахти із видобутку залізної руди. Очікується, що потужність проєкту складатиме 1300 МВт.

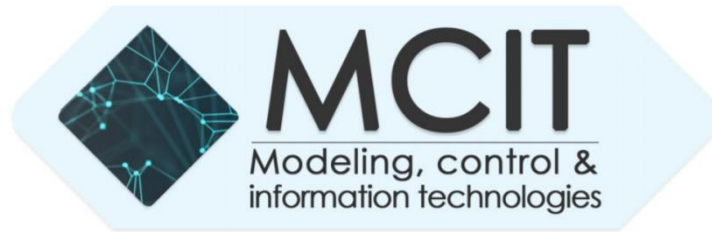
Відповідно до інформації Міжнародної гідроенергетичної асоціації (МГА), загальні гідроакмулюючі потужності у світі складають наразі 142 ГВт. Існує цілком чітка тенденція до будівництва не лише нових ГЕС і ГАЕС, але й модернізації існуючих. Цей поштовх до додаткових гідроакмулюючих потужностей має численні

мотивації, основна з них – це бурхливий прорив до більшого вжитку сонячної та вітрової енергії, технологій відновлюваних джерел енергії, які вимагають дублювання, адже повинна підтримуватися гарантована стабільність постачання енергії споживачам. Ідеальним рішенням, якщо не єдиним реальним, є ГАЕС. Попит на потужні, надійні акумулюючі станції в найближчі десятиліття лише зростатиме, оскільки світова економіка непохитно повертається до чистої енергетики.

Відповідно Енергетичної стратегії до 2035 року в Україні планується нарощування гідроенергетичних потужностей, які відіграють важливу роль у стійкості ОЕС України. Так, до 2026 року Укргідроенерго планувало побудувати Дністровську ГАЕС, яка складатиметься із 7-ми гідроагрегатів загальною потужністю 2268 МВт в генераторному режимі та 2947 МВт в насосному. Також компанія має побудувати та ввести в експлуатацію Канівську ГАЕС потужністю 1000 МВт, та Каховську ГЕС-2 потужністю 250 МВт. Реалізація перерахованих проєктів дозволить довести частку маневрових потужностей ГЕС та ГАЕС у загальному балансі галузі до 16% [2].

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Гідроенергетика є найбільшим джерелом відновленої енергетики в світі. [Online]. URL: https://uhe.gov.ua/media_tsent/novyny/gidroenergetika-e-naybilshim-dzherelom-vidnovlyuvanoi-enerгии-u-sviti. (Accessed: October 16, 2023).
- [2] Міжнародне енергетичне агентство. [Online]. URL: https://uhe.gov.ua/media_tsent/novyny/mizhnarodne-energetichne-agentstvo-gidroenergetika-matime-naybilshu-cinnist. (Accessed: October 16, 2023).



ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (ІоТ) ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ

Determining job category using AWS machine learning cloud services

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.070>

Vitalii Pavliuk

Department of Automation, Electrical Engineering and
Computer-Integrated Technologies
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine

Volodymyr Drevetskyi

Doctor of technical sciences, Professor
National University of Water and Environmental
Engineering
Rivne, Ukraine
v.v.drevetskyi@nuwm.edu.ua

Abstract—In this article, the focus is on the modern role of information technology in the labor market, with special emphasis on automation and optimization of processes through cloud solutions. The main theme is the creation of a system for the automatic categorization of job vacancies using Amazon Web Services (AWS). The authors describe the key advantages of implementing cloud technologies, such as scalability, cost savings, availability, and high productivity. Specific AWS services are then discussed, including ECS, DynamoDB, AWS Glue, Amazon SageMaker, and AWS Lambda, which can be applied for the implementation of this system. The article aims to show how AWS technologies can be used to improve efficiency.

Keywords—information technology; cloud services; Amazon Web Services; job categorization; automation; labor market.

I. INTRODUCTION

In today's world, it's impossible to overstate the role of information technology, which has become an integral component of various aspects of our lives. Particularly relevant is the implementation of IT in the labor market, where technology opens up endless opportunities for automation and optimization of processes aimed at increasing efficiency and productivity. One of the main advantages of using information technology is the ability to apply cloud solutions. Utilizing cloud technologies offers several benefits, including:

- **Scalability:** Cloud services allow for easy scaling of resources according to needs, optimizing computational power.
- **Cost Savings:** The absence of the need to purchase and maintain one's own equipment reduces expenses, allowing you to rent resources only when necessary.
- **Availability:** Cloud solutions provide access to data and resources from anywhere in the world, contributing to the flexibility and mobility of work processes.
- **High Productivity:** The ability to rent high-performance computing machines for a short term allows for complex calculations and data analysis in a short amount of time.

Within the framework of this article, we explore the creation of a system for automatic job categorization using Amazon Web Services (AWS). Utilizing AWS allows us to take advantage of all the benefits of cloud technologies, facilitating an effective and flexible project implementation. We will be using AWS services such as ECS, DynamoDB, AWS Glue, Amazon SageMaker, and AWS Lambda. These tools will not only aid in automating the job categorization process but also ensure stable and efficient system operation at various stages of its implementation.

II. COMPARING CLOUD COMPUTING SERVICES

Cloud computing has transformed the way organizations and individual users interact with technology and process data. Today's major cloud service providers are Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, and Google Cloud Platform (GCP).

AWS is the most mature and widely used provider globally. It offers a wide range of services and tools that can meet the needs of virtually any business or project. In terms of reliability, AWS offers advanced solutions for backup, recovery, and security.

Microsoft Azure, on the other hand, is often chosen by companies already using Microsoft products like Windows Server, Active Directory, and others. Azure offers deep integration with Microsoft products and has a wide array of supported services.

Google Cloud Platform (GCP) is known for its capabilities in big data processing and machine learning. It also offers efficient solutions for distributed computing and data storage.

Thus, considering the experience, diversity of services, and global presence, AWS stands out as a highly effective solution for cloud computing. This makes AWS an attractive choice for organizations looking to scale their operations, optimize resources, and increase productivity through cloud technologies. In this article, we will also be using Amazon Web Services as the cloud computing provider.

III. DATA COLLECTION

To develop and train a job category prediction model, a large amount of data is required. In this article, the data source is the jobs.dou.ua website, one of the most popular job search resources in the IT industry in Ukraine. Web scraping is used for automatic data

collection from web pages. Selenium library for Python is used to scrape job vacancies from jobs.dou.ua. The script, written with Selenium, visits the job pages, gathers information on each job (like title, description, category, location, etc.), and saves it.

This script is deployed using AWS Elastic Container Service (ECS), a powerful cloud tool for container management. AWS ECS allows easy definition of virtual machine specs in the cloud using a Docker file. AWS ECS manages containers at a high level, optimizing resource allocation and ensuring high availability.

After the data collection stage, it's essential to save the data in a structured and optimized format. AWS DynamoDB is used for data storage, a high-availability NoSQL database that's ideal for fast access to large data sets. DynamoDB's deep integration with the AWS ecosystem simplifies interaction with other cloud services.

To automate data storage, the article uses integration of the Selenium script with AWS SDK. This allows automatic transmission of collected data to a DynamoDB table right after collection. Going forward, the collected data will be used for export, cleansing, and preparation processes, as well as training a machine learning model aimed at labor market analysis and classification.

IV. EXPORT AND DATA PREPARATION

After the stages of gathering and storing data in DynamoDB, the next step involves exporting this data for further preparation and processing. To create aggregated files containing all the collected job vacancies along with their respective categories, it's essential to use effective data processing tools.

For this task, we use AWS Glue to export the data from DynamoDB to Amazon S3. AWS Glue is a scalable and fully managed ETL (Extract, Transform, Load) service, which significantly simplifies the data preparation process for analytical needs.

We create a task in AWS Glue with the aim to read data from the relevant DynamoDB table, process it into the required format, and store the results in an Amazon S3 bucket in CSV format. This allows us to have a centralized and optimized data repository, ready for further analytical operations and machine learning model processing. The task also splits the data into training and validation sets, so we end up with two files.

After creating the ETL task, it needs to be run. AWS Glue automatically provides the necessary resources for task execution and scales according to the volume of data. After the successful execution of the task, the data from DynamoDB has been exported to the Amazon S3 bucket as structured files, ready for further processing and analysis. This process is an essential part of data preparation, as it ensures the uniformity, structure, and availability of data for subsequent stages of work with machine learning.

V. MACHINE LEARNING MODEL

Amazon SageMaker is a fully-featured service that enables developers and researchers to quickly build, train, and deploy machine learning models at any scale.

SageMaker includes a wide range of capabilities, from convenient notebooks for model development and integration with popular frameworks (such as TensorFlow and PyTorch), to automatic scaling and resource management for training and deploying models.

In addition, Amazon SageMaker offers an extensive collection of built-in algorithms that cover a broad spectrum of machine learning tasks, from regression and classification to neural networks and model complexity enhancement. These algorithms are optimized for high-performance execution on large-scale data and are designed to work 'out-of-the-box' without the need for complex configurations.

Given this diversity and flexibility that Amazon SageMaker provides, we had to make a well-founded choice of algorithm for our job classification task. Our choice was the BERT algorithm (Bidirectional Encoder Representations from Transformers). BERT is a modern natural language processing algorithm, known for its ability to effectively analyze text, taking into account the context of words in a sentence. Using BERT with SageMaker gives you access to a high-quality algorithm, plus the scalability and optimization that comes with AWS's cloud infrastructure. It's essential to understand why we went for BERT:

- **Understanding Context:** Unlike traditional language models, BERT actually learns the context of a word by peeping at the words before and after it. This is a big deal, especially because job listings often contain highly contextual information.
- **High Accuracy:** BERT has been like the Michael Jordan of natural language processing tasks, showing top-level accuracy in things like text classification. This can help us achieve high accuracy in job vacancy categorization.
- **Pre-Trained Models:** BERT brings a treasure trove of pre-trained models built on massive datasets. It's like tapping into an existing reservoir of wisdom to elevate our model, without having to train it from scratch.
- **Transfer Learning:** Thanks to BERT, we can use transfer learning where the core model can be fine-tuned to specific job vacancy data, allowing us to embed the unique features and context of our domain.
- **Speed and Efficiency:** Despite the complexity of the model, BERT is optimized for quick processing, making for efficient training and high-speed predictions.
- **Language Flexibility:** BERT has been trained on datasets in multiple languages, making it effective for handling texts in various languages.
- **Adaptation to Complex Tasks:** BERT has a deep architecture that enables it to adapt effectively to complex tasks and data structures.

All in all, given these advantages, BERT is a great choice for our job classification task. It promises deep text understanding and high prediction accuracy.

For effective development and tuning of the machine learning model, we'll set up a notebook in Amazon SageMaker. A notebook is like your wizard's spellbook for coding, parameter tweaking, and data experimenting.

After configuring the parameters and choosing the BERT algorithm in the SageMaker notebook, we initiate the training process by pointing to our data stored in Amazon S3. SageMaker takes care of the resource provisioning like a good backstage manager. Using a test dataset, we'll evaluate the model's performance to see how well it's playing the job-classification tune. Once we're past the training and evaluation stage, we can deploy the model via Amazon SageMaker. The service allows you to launch the model as a web service that can accept requests and return real-time predictions.

VI. WEB SERVICE USING AWS LAMBDA

After deploying the machine learning model on Amazon SageMaker, the next step is to integrate this model with a web interface that allows users to get predictions through HTTP requests. AWS Lambda and Amazon API Gateway play key roles in this process.

Initially, we create an AWS Lambda function via the AWS Management Console. The essence of the Lambda function is that it receives HTTP requests, interacts with the machine learning model in SageMaker, and sends back predictions. It's crucial to set up this function correctly so that it can accept and process data in a specific format and also send back responses in a user-friendly format.

To let the Lambda function communicate with SageMaker and other AWS services, we need to create an IAM role with appropriate access policies. This gives the Lambda function the needed permissions to call the SageMaker model and handle data.

To enable the Lambda function to receive HTTP requests from the Internet, we should integrate it with Amazon API Gateway. API Gateway lets us create, publish, and manage APIs in a scalable environment. After configuring the API Gateway, we deploy the API, which generates a public URL for interacting with the Lambda function.

With the configuration and deployment of the API Gateway complete, we can proceed to test the web service by sending HTTP requests to the public URL generated via API Gateway. This can be done using various tools like Postman or CURL, as well as by integrating the API into web or mobile apps for real-world use.

CONCLUSION

This article explored the process of gathering, processing, and analyzing job vacancies from the website jobs.dou.ua using various AWS services. It demonstrated how cloud computing technologies can be used to create a complex data processing system and develop a machine learning model.

The main stages of work included:

- Data Collection - Using Selenium, a script was created for automatic collection of job vacancies from jobs.dou.ua.
- Data Storage - The collected data was stored in an Amazon DynamoDB database, providing a fast and reliable way to stash the goods.
- Data Export - With the help of AWS Glue, the data was exported from DynamoDB to Amazon S3 for further analysis.
- Machine Learning Model Development - Using Amazon SageMaker, a machine learning model was developed to predict job categories.
- Web Service Implementation - Utilizing AWS Lambda and API Gateway, a web service was set up to let users fetch those model predictions through HTTP requests.

For future work, we can gather data from other job search websites that don't have clear categories, and now we can predict these categories using the machine learning model we've built.

Overall, this article showcased the potential of cloud technologies in the realm of data processing and machine learning. Using AWS allowed us to automate and optimize various aspects of the process, leveling up the efficiency and flexibility of the whole shebang.

REFERENCES

- [1] AWS Well-Architected Framework. [Online]. URL: <https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/framework/welcome.html>. (Accessed: October 17, 2023).
- [2] T. Nguyen. Gentle Introduction to How AWS ECS Works with Example Tutorial. [Online]. URL: <https://medium.com/boltops/gentle-introduction-to-how-aws-ecs-works-with-example-tutorial-cea3d27ce63d>. (Accessed: October 17, 2023).
- [3] Build, Train, and Deploy a Machine Learning Model with Amazon SageMaker. [Online]. URL: <https://aws.amazon.com/getting-started/hands-on/build-train-deploy-machine-learning-model-sagemaker/>. (Accessed: October 17, 2023).
- [4] Introduction to AWS Lambda Serverless Architecture. [Online]. URL: <https://www.serverless.com/learn/quick-start/>. (Accessed: October 17, 2023).

Distillation of Large Language Models for Text Simplification

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.071>

Oleksandr Skurzhanskyi

Department of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine

oleksandr.skurzhanskyi@gmail.com

Abstract—This work presents a comprehensive methodology for harnessing the capabilities of Large Language Models to address specific Natural Language Processing tasks, with a focus on Text Simplification. While LLMs have demonstrated their prowess in tackling a wide range of NLP challenges, their demanding computational requirements can render them impractical for real-time online inference. In response to this limitation, we suggest the concept of text distillation, a technique aimed at effectively transferring the knowledge stored within LLMs to more compact and computationally efficient neural networks.

Keywords—artificial intelligence; natural language processing; large language models; text simplification.

I. INTRODUCTION

In recent years, the field of Natural Language Processing (NLP) has witnessed a remarkable transformation, primarily driven by the advent of Large Language Models (LLMs, such as InstructGPT [1]). These models, often comprising billions of parameters, have exhibited unprecedented proficiency in solving a multitude of NLP tasks, ranging from machine translation [2] to sentiment analysis. However, their widespread adoption has been somewhat hindered by their substantial computational demands, which can impede their practicality for applications that require real-time processing.

This paper addresses the challenge of making LLMs more accessible for NLP tasks that demand efficiency, with a particular focus on Text Simplification. Text Simplification constitutes a vital aspect of NLP, aiming to make complex texts more comprehensible while preserving their core meaning. To tackle this challenge efficiently, we employ a data distillation approach. The process begins with the selection of a relevant prompt tailored to the nature of the tasks. Subsequently, we generate examples using a Generative AI approach, LLM. Finally, we train a fast, small transformer-based model using this distilled data.

II. RELATED WORKS

Several strategies have been proposed to mitigate the computational burden associated with deploying Large Language Models (LLMs for online inference. One prominent approach, as introduced by Geoffrey Hinton, Oriol Vinyals, and Jeff Dean in their seminal work "Distilling the Knowledge in a Neural Network" [3],

involves the utilization of text distillation. This technique seeks to distill the knowledge contained within LLMs into smaller, more streamlined neural networks.

In their paper, Hinton et al. presented the concept of model distillation, demonstrating that it is possible to transfer the knowledge stored within a complex neural network (called "teacher") to a smaller and faster network ("student"). This process involves training the student network to mimic the teacher network's behavior, effectively transferring its knowledge while reducing computational demands. While their work primarily focused on traditional neural networks, the principles of knowledge distillation have found widespread application in the context of LLMs, contributing to the development of efficient NLP solutions.

In addition to distillation techniques, researchers have explored model quantization, where LLMs are pruned or quantized to reduce their memory and computational requirements [4]. Model quantization involves compressing the parameters of large models into a smaller representation while maintaining performance. This approach has gained traction due to its ability to significantly reduce the memory footprint and inference latency of LLMs, making them more suitable for resource-constrained environments.

Furthermore, efforts have been made to create domain-specific LLMs, which are tailored to excel in particular NLP tasks while maintaining a more modest model size. These domain-adapted LLMs are fine-tuned on specific datasets and tasks, allowing them to achieve competitive performance with reduced computational demands. Such specialization enhances the efficiency of LLMs for task-specific applications, addressing the challenge of adapting these powerful models to real-world scenarios with limited computational resources.

III. APPROACH

Our methodology for achieving efficient Text Simplification using Large Language Models (LLMs) revolves around the concept of data distillation. Rather than directly applying knowledge distillation by altering the loss function (just like in the Hinton's paper), we find it more practical specifically for text generation models to generate data and utilize this data for training — a process we refer to as data distillation. The challenge lies in adapting loss modifications while

preserving token probabilities, a task complicated by the autoregressive nature of text generation.

A. Prompt Selection

The data distillation process begins with the careful selection of a relevant prompt tailored to the nature of the Text Simplification task at hand. These prompts act as specific instructions to the LLM, guiding it to generate simplified versions of complex texts while preserving their essential meaning. Crafting effective prompts is a crucial step in ensuring that the generated examples align with the objectives of Text Simplification.

For instance, prompts may instruct the model to "simplify the following passage while maintaining clarity" or "paraphrase the text to enhance readability." In our experiments prompt "You are a helpful AI assistant with extensive linguistic knowledge. Rewrite the following text to make it simpler and more straightforward."

B. Dataset generation

Next, we harness the capabilities of a Generative AI model, ChatGPT [5], to generate a substantial dataset of training examples. ChatGPT is a versatile language model capable of producing coherent and contextually relevant text based on given prompts. In our case, we design prompts specifically to elicit simplified versions of complex texts, thereby aligning the examples with the objectives of Text Simplification. ChatGPT's proficiency in text generation makes it a valuable tool for generating high-quality training data for our task. For example, given a complex medical document, ChatGPT can be prompted to simplify medical jargon and convoluted sentences, resulting in more accessible content.

C. Training compact model

Once we've generated a dataset of simplified text examples through data distillation, we proceed to train a compact transformer-based model designed for efficiency, featuring a reduced parameter count compared to the original LLMs.

For selecting the transformer-based model, we prioritize size without sacrificing quality. We also recommend employing a reduced number of decoder layers, a practice that has demonstrated a significant acceleration in inference time [6]. The training process involves fine-tuning the model on the generated examples while optimizing for both performance and computational efficiency.

Our primary objective is to develop a model capable of efficiently producing simplified text without compromising quality. In pursuit of this goal, our training process may incorporate techniques such as model quantization to further minimize the model's memory footprint while preserving performance. Specifically, floating-point 16 (fp16) quantization is a

noteworthy approach, as it typically maintains performance levels while reducing memory usage by a factor of two.

IV. CONCLUSIONS

In this paper, we have presented a comprehensive methodology for achieving efficient Text Simplification using Large Language Models (LLMs). Our approach revolves around the concept of data distillation, which leverages the strengths of LLMs to generate high-quality training examples for a compact transformer-based model. This methodology offers a practical solution to the computational challenges associated with LLMs, making them more accessible for Text Simplification and similar Natural Language Processing (NLP) tasks.

Our research has highlighted several key insights:

- **Data Distillation for Improved Efficiency:** Data distillation, as an alternative to traditional knowledge distillation, proves to be a highly effective approach for Text Simplification. By generating simplified text examples through ChatGPT and using them for training, we achieve both efficiency and quality in the final simplified outputs;
- **The Significance of Prompting:** Carefully crafted prompts play a crucial role in guiding LLMs to generate relevant and high-quality simplifications. The choice of prompts directly impacts the success of the data distillation process.
- **Compact Transformer-Based Models:** Our choice of a compact transformer-based model, tailored for efficiency, demonstrates the practicality of reducing parameter counts while maintaining performance. This model choice, coupled with techniques like model quantization, enables efficient inference without compromising the quality of the simplified text.

REFERENCES

- [1] L. Ouyang, J. Wu, X. Jiang, D. Almeida, C. Wainwright, P. Mishkin, et al. Training language models to follow instructions with human feedback. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2022. Vol. 35. Pp. 27730–27744.
- [2] I. Sutskever, O. Vinyals, and Q. V. Le. Sequence to sequence learning with neural networks. *Advances in neural information processing systems*. 2014. Vol. 27.
- [3] G. Hinton, O. Vinyals, and J. Dean. Distilling the knowledge in a neural network. arXiv preprint arXiv :1503.02531, 2015.
- [4] A. Polino, R. Pascanu, and D. Alistarh. Model compression via distillation and quantization. arXiv preprint arXiv :1802.05668, 2018.
- [5] ChatGPT. [Online]. URL: <https://chat.openai.com/>. (Accessed: August 24, 2023).
- [6] J. Kasai, N. Pappas, H. Peng, J. Cross, and N. A. Smith. Deep encoder, shallow decoder: Reevaluating non-autoregressive machine translation. in ICLR 2021, 2021.

Orchestration Of Model Computing Assets For The Development Of Digital Twins

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.072>

Oleksandr Stepanets

Department of Automation of Energy Processes
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine

Anastasia Zakharchenko

Department of Automation of Energy Processes
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine
zakharchenko.anastasia@nll.kpi.ua

Abstract—With the development of industries and manufacturing requirements, the use of digital twin technology is promising for increasing efficiency and improving product quality. An important component of digital twin implementation is the provision of tools for modeling and simulation processes. In this study, a solution based on the use of Python-based models and the Controller software platform, which provides communication between models and external elements of digital twins and other IIoT solutions, was proposed as such a toolkit. It defines the main approaches for creating model, scenario, and function libraries, along with the concept of implementing dynamic scenarios based on JSON requests from the orchestrator. In addition, the algorithm, the structure of the Controller, and its main functionality are considered. The resulting solution takes advantage of the Python and Node.js languages in performing the relevant tasks and contains several solutions that reduce traffic and workload on communication systems, increase system reliability, scale the system, etc.

Keywords—Digital Twins; Python; Node.js; Modeling; Simulation; IIoT.

I. INTRODUCTION

Industrial automation systems are becoming increasingly complex for various industries. The requirements for energy efficiency, environmental friendliness and reliability, and product quality are rising [1]. The use of modern technologies, such as artificial intelligence, data-driven technologies, digital twins, and IIoT, is aimed at ensuring progress. Also, it promotes the development of the modeling and simulation field, not only in terms of studying the object's behavior but also as a full-fledged tool necessary to analyze the system's operation in near real-time. Modeling is an integral part of what-if analysis, decision support systems, energy consumption planning, virtual sensors, etc., which are part of modern intelligent user support systems and could be integrated directly into control systems.

The use of cloud technologies is one of the main concepts of IIoT and the development of digital twins, allowing the storage, processing, and transmission of huge amounts of data generated by sensors and services [2; 3]. The use of cloud computing and analytics makes it possible to obtain detailed information about the state of an object in real-time, using the computing power

required at the moment. Implementation of modeling capabilities based on cloud applications allows the use of their functionality as a service with the ability to deploy the required number of modules.

Based on these conditions, this article investigates the organization of Python-based mathematical model simulation processes using the available tools of the Node.js platform as a cloud service.

II. GENERAL CONCEPT

Developing highly detailed models of technological processes or their elements and creating their computer code representation raises the issue of implementing research results into industry, incorporating them into analytics, and dynamically comparing the performance of certain equipment with the expected results. The integration of computer models IIoT-based solutions and the design of digital twins has led to the challenge of developing a special software platform that manages and coordinates modelling, analytics, etc.

For this purpose, IIoT and digital twin solutions will be considered as a set of special modules or services that are managed and synchronized by a special orchestrator [3]. Thus, in this paper, we focus on the encapsulated, independent part of the "orchestrator-computing module" of a distributed system. Such separation allows for improving the system's reliability, given that in case of errors or loss of communication on one of the modules, it does not cause the collapse of the entire system.

There are a number of requirements for the model Controller platform's development, which are based on the specific conditions of our task and skills, as well as questions about future project growth. These include:

- support for computer models created in Python;
- security of data transmission;
- project scalability;
- the ability to exchange data between platforms and services;
- the ability to configure the platform according to the user's objects and tasks;

- universality of solutions and the ability to additionally use them to implement analytical codes;
- support for real-time data transfer;
- control of calculations, logging, alarming and reporting of possible errors.

Accordingly, certain functions are also distributed between them (Fig. 1).

III. PYTHON-BASED MODELS

Different model types can be used to describe the behavior of objects, including static and dynamic mathematical models. At the same time, one object can have several models that use different approaches, accuracy, scale, etc. [4]. Thus, the platform can have a library of object models, their elements, certain internal processes, etc. Their combination enables modeling more complex processes and creates a number of possible scenarios. The models working is supported by a library of additional functions, including data conversion, transmitting to other software applications, averaging, related Python libraries and modules, post-processing etc. (Fig. 2). In particular, the related NumPy and SciPy modules can be included.

The model library is a set of classes that contain the mathematical description of an object or its element and

functions that allow one to calculate static and dynamic models depending on the request. When a particular query is executed, the orchestrator launches the corresponding modeling script, which may include a certain arrangement of elements from the class library and function library. As a first approximation, such scenarios were written statically as separate Python scripts.

A special type of scenario is real-time work based on the Mixed Discrete-Continuous Simulation approach [5] and employing a fixed-time algorithm. In general, the algorithm is described in Fig. 3.

Although this algorithm and the static description of scenarios have shown a stable operation, to implement modularity and integration of Digital Twin functions, automatic scenario layout, and improve system flexibility, we observe the need to implement dynamic scenario layout by the orchestrator's request. In this case, the orchestrator forms the structure of the scenario in the form of a JSON [3] with the specified initial conditions of the system based on the information about the models. During initialization, the Scenario class accepts a set of model classes, their arguments, and a description of its structure as a variable-length argument list (**kwargs), creating a corresponding set of instances and using sequential calls to their functions.

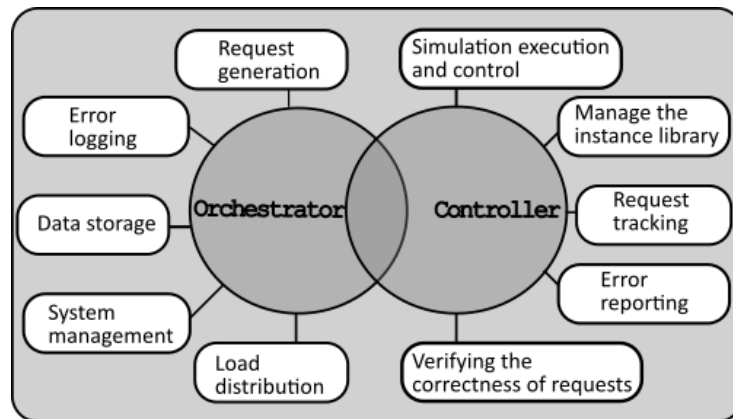


Figure 1. Functionality of Orchestrator and Controller sides

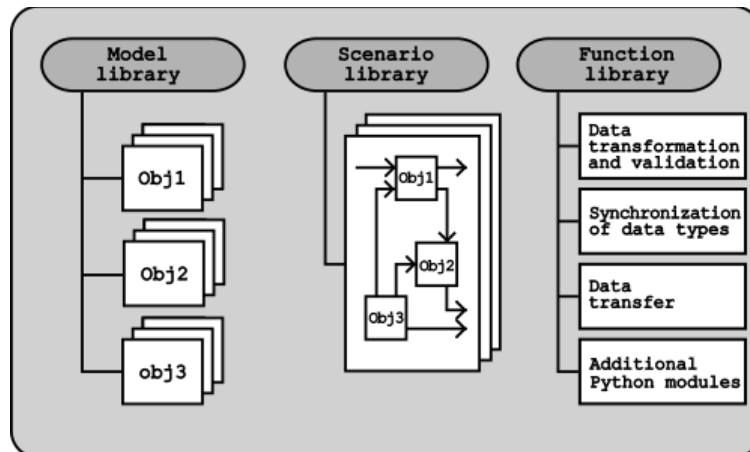


Figure 2. Basic structure of Python-based models realization

```

•{module and model library import}
•{initialization of state variables}
•{model initialization}
while True:
  •{current sampling time calculation}
  •{update model status}
  •{new data processing and storage}
  •{result transmission}
  •{waiting for the next iteration using the time.sleep() function}
    
```

Figure 3. Algorithm of real-time process calculation

IV. NODE.JS-BASED PLATFORM

In developing software to support modeling processes, Node-Red was initially considered to be a tool for managing data flows [6]. However, due to the need to use different environments and to avoid conflicts between specific environment nodes related, for example, to their updates, as well as the necessity to install additional software, organize access to the file system, etc. it was decided to use node.js as the main platform for developing a universal platform.

In the proposed solution the MQTT broker is used to communicate between the Controller and the Orchestrator and to transmit data further to the target destination. Each Controller has its own unique identifier and monitors a specific topic for the presence of commands addressed to it. After receiving a message, the Controller evaluates the correctness of the received command in accordance with the functionality allowed by the platform deployment, the list of accounting objects in the instance library, the required models and analytical functions in the library, and the availability of the necessary arguments for them. If there are conflicts between requests and the Controller's capabilities, it returns an error with a corresponding message that is logged by the orchestrator. Otherwise, the corresponding script is launched as a child process, the results of which are returned as a ready-to-send JSON message to the Data Sender and sent via the MQTT Client (Fig. 4). The use of centralized data transfer allows you to separate the calculation process and reduce the number of clients for the MQTT broker compared to direct access to communication tools by Python script. This enables additional data verification before sending and the ability to save work results in case of a connection loss.

The Controller manages its instance library, which contains the main design characteristics of equipment and processes that do not change over time and are necessary for modeling. The purpose of this library is to reduce traffic between elements of a branched system and to keep track of objects that are within the area of responsibility of a particular Controller.

One object instance could be duplicated in the libraries of several separate Controllers, which will allow the Orchestrator to distribute the computing workload more evenly and improve the reliability of the distributed system by using redundancies in case of a loss of functionality or communication of one of the platforms.

V. FUTURE STEPS

The proposed system has a number of conceptual solutions that form the basis and, in our opinion, are prospective for further research. The following studies focus on optimizing the performance of computational codes and continuing work on dynamic scenario composition to develop a single general approach to describe heterogeneous object models. Also, we are working to expand the library of models and analytical functions for conducting experimental studies on real objects.

In addition to the direct improvement of the system itself, it is planned to develop solutions for integrating the work results into control systems to obtain practical benefits and evaluate them in the field.

VI. CONCLUSION

In this paper, we considered approaches to the realization of the modeling and simulation of processes as a separate module that can be used as a service for various IIoT solutions and the implementation of digital twin functions. The proposed solutions have a modular nature, which enables them to distribute traffic, provide high response speeds, and parallelize information flows. They allow for high reliability of the developed system in case of off-design errors, loss of communication or system performance due to redundant computing capabilities on other platforms, data storage until the ability to transmit data is restored, etc.

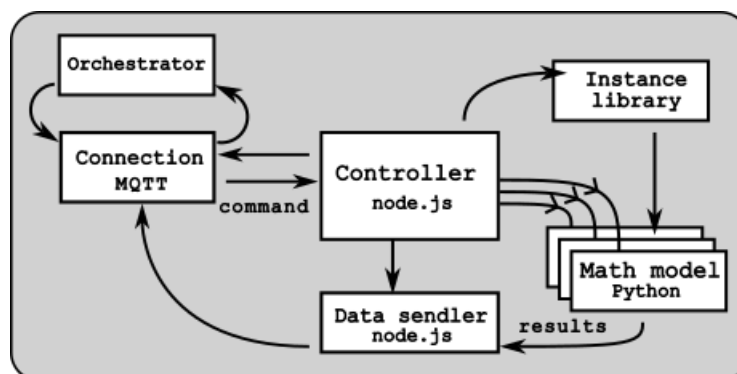


Figure 4. Basic structure of Node.js-based Controller

The platform takes advantage of the Python and Node.js languages to perform relevant tasks and contains a number of solutions that reduce traffic and the load on communication systems, such as organizing centralized communication with an MQTT broker and creating its own library of object instances.

The use of a distributed system for modeling objects has high prospects. Therefore, we are planning to continue research in the area of optimizing computational loads, developing a model library, and integrating the results into control systems.

REFERENCES

- [1] Z. Gao. Special Issue on Modelling, Monitoring, Control and Optimization for Complex Industrial Processes. *Processes*, 2023. 10.3390/pr11010207.
- [2] K. Agalinos, S. Ponis, E. Aretoulaki, G. Plakas, O. Efthymiou. Discrete Event Simulation and Digital Twins: Review and Challenges for Logistics. *Procedia Manufacturing*, 2020. Vol. 51(2). Pp. 1636–1641. 10.1016/j.promfg.2020.10.228.
- [3] G. De Giacomo, D. Ghedallia, D. Firmani, F. Leotta, et al. IoT-based Digital Twins Orchestration via Automated Planning for Smart Manufacturing. *Workshop on Generalization in Planning (GenPlan)*, 2021.
- [4] U. Dahmen and J. Rossmann. Experimentable Digital Twins for a Modeling and Simulation-based Engineering Approach. *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, Rome, Italy, 2018. Pp. 1–8. doi: 10.1109/SysEng.2018.8544383.
- [5] N. Karanjkar and S. M. Joshi. A Python-Based Mixed Discrete-Continuous Simulation Framework for Digital Twins. *International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*. Cham : Springer International Publishing, 2021. Pp. 204–223.
- [6] C. Steinmetz, G.N. Schroeder, A. Binotto, S. Panikkar et al. Digital Twins modeling and simulation with Node-RED and Carla. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55(19). Pp. 97–102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.190>.

Валідація процесу куріння за допомогою комп'ютерного бачення

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.073>

Петро Головецький

Факультет математики та інформатики

Кафедра інформаційних технологій

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

м. Івано-Франківськ, Україна

petro.holovetskyi@gmail.com

Анотація—Розглянуто проблему валідації контенту, що містить процес куріння. Запропоновано метод валідації контенту, що містить процес куріння. Розглядається методика використання сучасної моделі комп'ютерного бачення YOLOv8-Pt2 та фреймворк MediaPipeline для валідації процесу куріння. Описуються технічні деталі і алгоритм обробки зображень та відео, що використовується для визначення наявності процесу куріння. Розроблено інформаційну систему, що здійснює виявлення процесу куріння за допомогою комп'ютерного зору. В результаті досліджень представлено можливість автоматичного виявлення куріння, що може бути використане для валідації та моніторингу дотримання правил щодо куріння в громадських місцях та на робочих місцях.

Ключові слова — комп'ютерний зір; розпізнавання об'єктів; згортова нейронна мережа; валідація процесу куріння.

I. ВСТУП

Куріння – це шкідлива звичка, яка може завдати серйозної шкоди здоров'ю людини. Воно є причиною багатьох захворювань, у тому числі раку легень, серцево-судинних захворювань, астми та цукрового діабету. Куріння також може призвести до залежності, що робить його дуже важко позбутися.

Крім того куріння може привести до різних нещасних випадків таких як: аварії на робочих об'єктах, лісові пожежі та пожежі на АЗС.

Проблема куріння набула світового масштабу, тому багато країн вже почали боротися з цією шкідливою звичкою. Багато де діють закони, які забороняють куріння в громадських місцях, таких як ресторани, бари та громадський транспорт. Це допомагає захистити некурців від шкідливого впливу пасивного куріння. В Україні з тютюнопалінням борються шляхом заборони курити у громадських місцях, зменшення реклами тютюнових виробів, заборони реклами засобів для нагрівання тютюну. У 2021 році наступним кроком у пропаганді здорового способу життя став законопроект №4358 [1].

Комп'ютерне бачення є перспективним методом валідації процесу куріння. Даний метод не вимагає прямого контакту з курцем, може бути досить

точним, щоб виявляти куріння в реальному часі. Також може бути масштабований для моніторингу великих територій або груп людей.

Важливо при цьому дотримуватися законів та правил, що регулюють приватність та використання відеоспостереження, і забезпечувати належний захист даних, зібраних за допомогою комп'ютерного бачення.

II. МЕТОД ВАЛІДАЦІЇ ПРОЦЕСУ КУРІННЯ

Для створення методу валідації процесу куріння потрібно виділити ознаки, які можуть бути використані комп'ютерним зором для виявлення цього процесу.

A. Наявність сигарети та попелу

Головною ознакою куріння, це наявність сигарети. Можна виявляти тільки наявність сигарети, але цього буде недостатньо, щоб стверджувати що людина курить. Сигарети можуть просто знаходитися в кадрі або може знаходитися предмет, який має подібний вигляд. Тому для більш детальнішої класифікації буде також виконаний пошук попелу на кінці сигарети.

B. Положення руки

За допомогою комп'ютерного зору можна відстежувати положення руки, та в залежності від утворення кута при згині руки робити припущення що відбувається процес куріння. Для цього потрібно вирахувати кут, який утворюється між трьома точками: плече, лікоть та кисть. Щоб отримати даний кут потрібно обчислити різницю арктангенсів з двома змінними [2]

$$R = \arctan2(C_1 - B_1, C_0 - B_0) - \arctan2(A_1 - B_1, A_0 - B_0), \quad (1)$$

де A – це значення точки плеча, яке розташоване на ху-площині. Відповідно, B це точка ліктя, а C це точка зап'ястя на ху-площині. Результатом обчислення буде кут R , який знаходиться між двома точками, тобто між плечем та кистю руки. Для зручності обчислення перетворимо значення кута з радіан в градуси

$$\theta = \frac{R * 180}{\pi}. \quad (2)$$

Після аналізу контенту, де були курців було виявлено, що під час куріння кут руки менше 30 градусів, та під час прикурюванню сигарети кут руки був менше 36 градусів.

Таблиця І. МАКСИМАЛЬНЕ ТА МІНІМАЛЬНЕ ЗНАЧЕННЯ КУТА ЗГИНУ РУКИ ПІД ЧАС ПРОЦЕСУ КУРІННЯ

	Кут згину руки при прикурюванню сигарети	Кут згину руки при курінні з піднятою рукою до рота
Максимальне значення	28.77 ⁰	36.5 ⁰
Мінімальне значення	3 ⁰	6.2 ⁰

Тому, якщо враховувати можливість неточності, які можуть появлятися в залежності від якості або ракурсу зйомки відео можна стверджувати, що відбувається процес куріння якщо кут згину руки знаходиться в наступних межах.

$$0^0 \leq \theta \leq 40^0 . \quad (3)$$

III. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ

Для пошуку сигарети та попелу на кінці сигарет було використано модель YOLOv8-Pt2 [3]. Це модель згорткових нейронних мереж сімейства yolov, яка була розроблена для кращої роботи на малих об'єктах. YOLOv8-Pt2 є вдосконаленою версією YOLOv8-P, яка була випущена в 2022 році. YOLOv8-Pt2 використовує архітектуру FPN (Feature Pyramid Network). Для даної моделі було створено датасет, який містить 583 зображення, де є сигарети та попіл на кінці сигарет.

Для відстежування положення рук було використано фреймворк MediaPipeline [4]. Цей фреймворк використовує модель машинного навчання, навчену на наборі даних, що містить зображення людей у різних позах. Модель здатна розпізнавати ключові точки на тілі людини, такі як голова, плечі, руки, ноги та кисті.

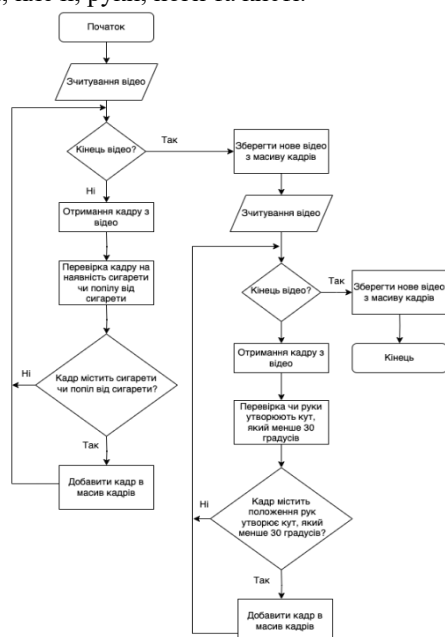


Рисунок 1. Алгоритм валідації контенту

Для виявлення процесу куріння користувачу потрібно вибрати відео або силку на відеопотік,

який відбувається в реальному часі. Процес валідації відбувається покадрово. Кожний кадр перевіряється на наявність сигарети та попелу на сигареті. Якщо кадр містить дані об'єкти тоді ці кадри будуть записані в масив кадрів, як кадри які потенційно можуть містити процес куріння. Якщо на кадрах не було знайдено сигарети чи попелу від сигарети, тоді буде братися наступний кадр.

При закінченні відео або відеопотоку буде створене нове відео, яке буде складатися з кадрів на яких потенційно зображено сигарета або попіл на сигареті. Потім створене відео буде перевірятися чи в людини положення руки утворює кут, який менше 30 градусів. Далі теж буде створено масив з кадрів на основі, якого буде створено відео. На основі послідного відео можна вважати, що відбувається процес куріння з високою ймовірністю.

Даний підхід зі створення двох відео на основі оригіналу дозволяє налаштувати процес валідації під свої потреби. В деяких випадках користувачу не потрібно відстежувати положення руки в залежності від ракурсу зйомки відео, наприклад коли рук не видно. Тоді буде збережено тільки перше відео, де буде міститися тільки кадри, що містять попіл або сигарету. Відповідно, якщо не буде виявлено ознак, що вказують на процес куріння тоді не буде створено жодного відео.

Для валідації процесу куріння на зображеннях буде використовуватися цей самий алгоритм, тільки він буде аналізувати один кадр.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було представлено метод валідації процесу куріння за допомогою комп'ютерного бачення. Метод використовує модель YOLOv8-PT2 та фреймвок MediaPipeline для виявлення сигарет та інших ознак куріння.

Метод можна використовувати для моніторингу куріння в громадських місцях, щоб забезпечити дотримання правил куріння. Також його можна використовувати для відстеження куріння у школярів та підлітків, щоб допомогти в профілактиці тютюнопаління.

У майбутньому планується покращити даний метод, використавши більшої кількості даних для навчання та додавання додаткових ознак що можуть вказувати на процес куріння. Також планується додати можливість вказувати, яка людина саме курить, якщо на відео знаходиться група людей.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] "Закон "Про внесення змін до деяких законів України щодо охорони здоров'я населення від шкідливого впливу тютюну"" [Online]. Available: <https://www.rada.gov.ua/news/Novyny/217935.html>. [Accessed: October 08, 2023].
- [2] "atan2 - Wikipedia." [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Atan2>. [Accessed: October 08, 2023].
- [3] "Ultralytics YOLOv8 Modes." [Online]. Available: <https://docs.ultralytics.com/modes/?h=yolov8>. [Accessed: October 08, 2023].
- [4] "MediaPipe | Google for Developers." [Online]. Available: <https://developers.google.com/mediapipe>. [Accessed: October 08, 2023].

Автоматизована система моніторингу якості повітря

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.074>

Олександр Павелко

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
Національний університет «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна
pavelkobond@gmail.com

Наталія Куликовська

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
Національний університет «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна
gontar@zp.edu.ua

Артур Тіменко

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
Національний університет «Запорізька політехніка»
м. Запоріжжя, Україна
timenko@zp.edu.ua

Анотація—Розглянуто проблему ведення контролю за якістю повітря у приміщеннях шляхом автоматизованої взаємодії різних пристроїв, які передають дані через мережу "Інтернет речей" (IoT). У процесі дослідження була створена структура системи та методи для аналізу та візуалізації даних, які були оброблені за допомогою IoT-технологій, таких як Proteus і Blynk, а також інших інструментів. Точне вимірювання параметрів повітря у приміщенні, що відповідають нормам якості повітря, має велике значення для створення комфортного та здорового житлового та робочого середовища. Вимірювання параметрів, таких як рівень CO₂, вологість та загальна якість повітря, може виявити можливі проблеми та сприяти прийняттю своєчасних заходів для їх вирішення. Був проведений аналіз системи та обґрунтування вибору програмно-технічних рішень, необхідних для впровадження цієї системи та її компонентів. Застосування технологій, таких як Arduino, Proteus і Blynk IoT, дало змогу створити систему моніторингу якості повітря в реальному часі у рамках сучасної концепції IoT. Ця розроблена система може служити прототипом для організації моніторингу у різних умовах і реагування на різноманітні надзвичайні ситуації.

Ключові слова—система моніторингу; якість повітря; температура; пил; вологість; вуглекислий газ; Arduino; Blynk; IoT.

I. ВСТУП

У реаліях сучасного світу, що характеризуються стрімким ростом технологічного прогресу, область моніторингу якості повітря визнається однією з найактуальніших і важливих для забезпечення життєвого комфорту та здоров'я людей [1]. Розвиток Інтернету речей (IoT) відкриває безмежні можливості для створення ефективних інструментів моніторингу, які б дозволили вчасно виявляти та відстежувати забруднення повітря в реальному часі [2].

Універсальність бездротових сенсорних мереж стає ключовим аспектом цього розвитку. Використання сучасних датчиків інтерфейсу IoT відкриває можливість створення системи моніторингу, яка має потенціал реагувати на різноманітні параметри повітряного середовища та забезпечувати оперативну інформацію для прийняття важливих рішень щодо здоров'я та безпеки [3, 4].

Мета статті спрямована на вивчення та аналіз можливостей використання IoT-технологій для створення систем моніторингу якості повітря. Вона розглядає питання інтеграції датчиків у бездротові сенсорні мережі та розробки алгоритмів обробки та аналізу даних, що дозволять точно та ефективно визначати стан повітряного середовища. Результати цього дослідження мають потенціал стати важливим внеском у підвищення якості життя та охорони довкілля.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

A. Структурна схема системи

Інформаційну систему моніторингу забруднення атмосферного повітря пропонується створювати за результатами аналізу та вибору оптимальних рішень складових технологій «Інтернет речей» відповідно запропонованої структури системи, показаною на рис. 1, з використанням IoT технологій.

Виходячи з даної структури системи, було виділено три основних модулі, а саме модуль пристроїв, модуль обробки даних, та модуль додатку.

- модуль пристроїв складається з плати керування системою, різноманітних датчиків, допоміжних пристроїв для емуляції їх роботи, компонентів для емуляції роботи COM-порту для з'єднання зовнішніх пристроїв через інтерфейс RS232;

- модуль обробки даних складається з певних інструкцій в кодї, які визначають допустимий діапазон значень датчиків, зчитують дані від датчиків, обробляють їх відповідно до цього діапазону та передають їх у модуль візуалізації даних для подальшого відображення;
- модуль додатку відображає отримані дані з датчиків, залежно від їх значень будуть обведені певним кольором. Після отримання даних, якщо значення датчиків знаходяться вище діапазону прийнятних значень – система сповістить користувача про дії, які треба виконати для того, щоб не наражати себе та своє здоров'я на небезпеку та покращити якість повітря. Цей модуль використовує програмний IoT застосунок Blynk та його вбудований функціонал для візуалізації отриманих даних з датчиків у режимі реального часу.

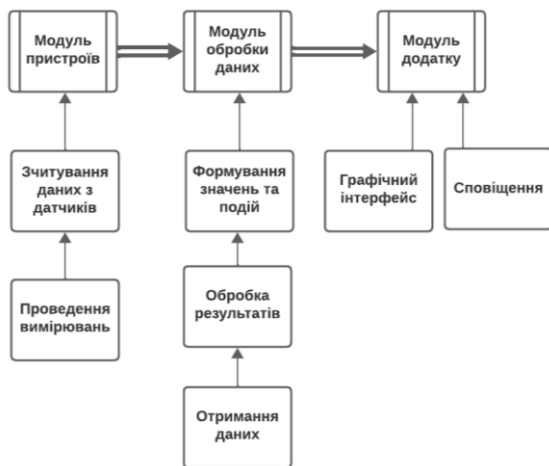


Рисунок 1. Структурна схема IoT-системи

В. Алгоритм роботи методу моніторингу в контексті прийняття управлінських рішень

Запропонований алгоритм складається з шести основних кроків (рис. 2):

- п. 1 – формування запиту;
- п. 2 – настає обробка даних відповідно до безпечного діапазону значень;
- п. 3 – якщо показники знаходяться в нормі, дані подаються споживачу у зручному вигляді, перехід на п.6;
- п. 4 – якщо показники даних не відповідають безпечному діапазону, користувачу буде надіслано сповіщення із рекомендаціями, перехід на п. 5;
- п. 5 – проводиться перевірка на зміну показників даних;
- п. 6 – користувач отримує дані від датчиків у зручному вигляді в додатку.

С. Класифікація параметрів оцінки якості повітря

Для системи моніторингу якості повітря було обрано наступні показники:

- температура повітря може впливати на комфорт та якість життя людей. Вона також може впливати на розчинені у повітрі речовини та їхню рухливість;
- вологість повітря може впливати на відчуття комфорту людей. Повітря з низькими рівнями вологості може викликати дискомфорт і негативно впливати на здоров'я та якість життя. Висока вологість може також сприяти росту грибків та плісняви;

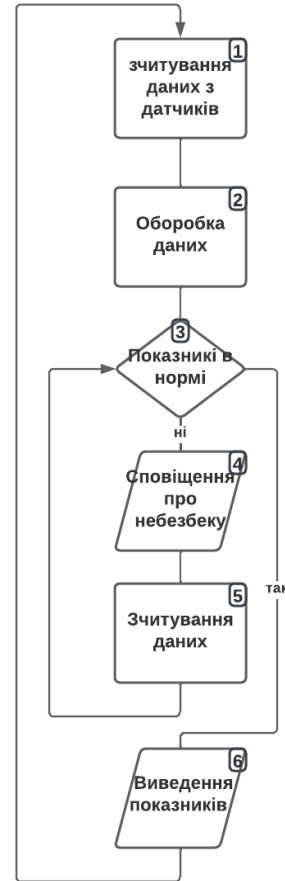


Рисунок 2. Алгоритм роботи

- вуглекислий газ (CO2). Підвищені рівні вуглекислого газу в повітрі можуть бути шкідливими для здоров'я людей, спричинюючи задишку та інші проблеми. Також вони можуть слугувати показником погіршення якості повітря в приміщенні;
- частинки пилу PM2.5 та PM10. Ці частинки в повітрі можуть бути дуже небезпечними для здоров'я, оскільки можуть проникати глибоко в дихальні шляхи та викликати різні захворювання легень та серця. Моніторинг рівнів цих частинок допомагає вчасно виявляти забруднення повітря і приймати заходи для його покращення.

Точне вимірювання граничних норм критеріїв якості повітря в приміщенні є важливим аспектом для забезпечення здорового і комфортного середовища для проживання та праці. Це особливо актуально в мегаполісах, де люди проводять більшу частину свого часу у закритих приміщеннях. Вимірювання таких параметрів, як концентрація

CO₂, рівень вологості і якість повітря, може виявити потенційні проблеми та сприяти прийняттючасних заходів для їхнього вирішення.

В таблиці 1 показані граничні норми критеріїв якості повітря, які можуть впливати на стан людини в приміщенні.

ТАБЛИЦЯ 1. КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ТЕМПЕРАТУРИ, ВОЛОГОСТІ, ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ, ЧАСТИНОК ПИЛУ PM2.5 ТА PM10

Критерій	Показники
Температура	Комфортною температурою повітря обрано діапазон від 9.6 °C до 34.8 °C.
Вологість	Вологість нижче 30% та вище 60% є шкідливою, тому як діапазон безпечних значень було вибрано вологість від 30% до 60%.
Вуглекислий газ	За концентрації діоксиду вуглецю вище 0,14% (1400 ppm) якість повітря переходить до розряду низької, тобто значення нижче 1400 ppm вважаються нормою.
Частинки пилу PM2.5	Безпечний діапазон: менше 12 мкг/м ³ (мікрограми на кубічний метр).
Частинки пилу PM10	Безпечний діапазон: менше 50 мкг/м ³ на добу.

III. ТЕСТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМИ

Провівши аналіз необхідних компонентів для роботи системи моніторингу повітря, було прийнято рішення додати до модулю пристроїв наступні компоненти:

- плата Arduino UNO;
- датчик MQ135 – це газовий сенсор, який вимірює концентрацію різних шкідливих газів у повітрі, зокрема, аміаку, сірководню, бензену та інших газів;
- потенціометр (POT-HG) – елемент, що використано як повзунок для зміни значень датчику MQ135;
- датчик DHT11 – це датчик, що вимірює температуру та вологість повітря.
- ще один датчик DHT11 – емуляція датчиків PM2.5 та PM10;
- comrim – це компонент, який емулює віртуальний COM-порт для з'єднання зовнішніх пристроїв через інтерфейс RS232.

Для відображення та можливості моніторингу було обрано ІоТ-систему Blynk. Вона дозволяє отримувати, зберігати, та відображати дані з датчиків в реальному часі. Було створено Template (шаблон) за яким буде потім створено Device, який буде приймати, зберігати та відображати інформацію з датчиків.

Для розуміння діапазонів прийнятних значень було встановлено певний колір, наприклад якщо в даний момент часу значення датчика в нормальному діапазоні, шкала біля нього буде зеленого кольору, якщо в діапазоні значень що вище або нижче норми – красним. Температура від 0 °C до 9.6 °C та 34.8 °C

до 60 °C буде вважатися шкідливою, тому шкала коло неї буде червоного кольору, якщо значення температури буде від 9.6 °C до 34.8 °C – зеленого. Для даних інших датчиків було зроблено аналогічні дії.

Для подій було встановлено частоту спрацьовування в 1 хвилину. Це означає що поки значення датчика буде в діапазоні поганих значень, кожену хвилину буде спрацьовувати подія та надсилатися в блок повідомлень (Timeline) девайсу. Безкоштовна версія Blynk зберігає ці повідомлення 1 тиждень, але платна версія може зберігати їх довше.

В результаті система зчитує дані з датчиків в реальному часі та відображає їх на панелі. Коли значення знаходяться вище або нижче норми в панель повідомлень надходять сповіщення про те, що варто зробити, щоб змінити якість повітря.

В результаті аналізу було вирішено використовувати мобільний застосунок для контролю системи (рис. 3).

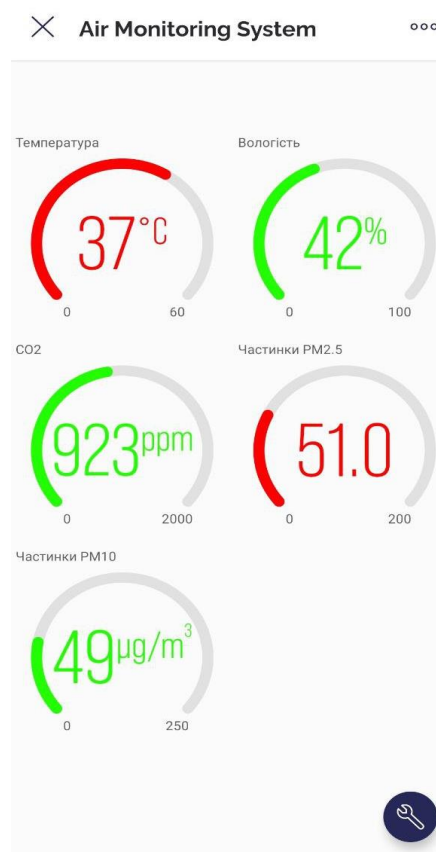


Рисунок 3. Панель моніторингу якості повітря

На рис. 4 наведено графіки зміни параметрів: вологості (рис. 4а), температури повітря (рис. 4б), вмісту вуглекислого газу (рис. 4в), а також концентрації частинок PM2.5 (рис. 4г) та PM10 (рис. 4д) протягом цього годинного періоду (як ілюстрацію). Графіки були побудовані за допомогою програмного забезпечення, описаного у даній роботі, та працювали в режимі реального часу.



Рисунок 4. Графік зміни параметрів повітря: а) зміна вологості; б) зміна температури; в) аналіз вуглекислого газу; г) аналіз частинок пилу PM2.5; д) аналіз частинок пилу PM10

IV. ВИСНОВКИ

Розглянута проблема моніторингу якості повітря на основі автоматичної взаємодії різних приладів, які передають дані, за допомогою технології "Internet of Things" (IoT). В ході роботи була розроблена структура системи і метод аналізу та візуалізації даних, результатів обробки з використанням IoT-технологій, таких як Proteus і Vlnk, а також інших інструментів.

Точне вимірювання граничних норм критеріїв якості повітря в приміщенні є важливим аспектом для забезпечення здорового і комфортного середовища для проживання та праці. Це особливо актуально в мегаполісах, де люди проводять більшу частину свого часу у закритих приміщеннях. Вимірювання таких параметрів, як концентрація CO₂, рівень вологості і якість повітря, може виявити потенційні проблеми та сприяти прийняттю вчасних заходів для їхнього вирішення.

Було проведено системний аналіз та обґрунтування вибору програмно-технічних рішень,

які необхідні для реалізації цієї системи та всіх її етапів. Використання таких технологій, як Arduino, Proteus і Vlnk IoT, дало можливість розробити систему моніторингу якості повітря в реальному часі в рамках сучасної концепції IoT. Ця розроблена система може використовуватися як прототип для організації моніторингу в змінних середовищах і реагування на різноманітні критичні ситуації.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] J. D. Hagar. IoT Test Design: Frameworks, Techniques, Attacks, Patterns, and Tours. *IoT System Testing*. 2022. Pp. 153–164.
- [2] C. Bell. Arduino Programming. *Beginning IoT Projects*. 2021. Pp. 71–125.
- [3] B. Russell, P. Waher, P. Seneviratne and D. V. Duren. IoT: Building Arduino-Based Projects. Packt Publ., 2016.
- [4] N. Kulykovska, A. Timenko, S. Hrushko, M. Ilyshenko. A Semantic Chatbot for Internet of Things Management. *International Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology*. (PIC S&T' October, 10–12, 2022), 2022. Pp. 246–250.

Програмування стану механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.075>

Владислав Поляков

Інститут транспортних систем і технологій НАН України
м. Дніпро, Україна

Анотація—Розроблено методику програмування стану механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда в його експлуатаційних режимах.

Ключові слова—магнітолевітуючий поїзд; механічна підсистема; розрахункова схема; фазовий простір; фазові координати; зображуюча точка стану.

I. ВСТУП

Результати теоретико-експериментальних досліджень у галузі перспективних наземних транспортних технологій [1] свідчать про практичну неможливість подальшого суттєвого нарощування їх інтенсивності без переходу на безконтактні системи підвищення, спрямування та руху екіпажів. Дуже перспективною [2; 3] виявилася реалізація цих систем, з використанням електромагнітного поля, у складі магнітолевітуючих поїздів.

II. ТИП КЕРУВАННЯ РУХОМ

Рух кожного такого поїзда, маючи основною своєю задачею переміщення пасажирів і вантажів, при реалізації регламентується графіком руху, що вимагає приведення його об'єкта до призначених моментів часу, або точок путі в апіорно задану послідовність станів. Тому керування цим рухом досить коректно і повно може здійснюватися в термінальній постановці [4] з накладенням реальних обмежень на простори фазових координат, збурень та керувань. Залежно від цілей та задач дослідження, ці множини можуть бути по-різному фізично інтерпретовані. У той самий час, у принциповому плані, керування практично будь-яким реальним рухом магнітолевітуючого поїзда може розглядатися як термінальне і, отже, синтезуватися як таке.

Шляхом класифікації та параметризації обстановки, в якій відбувається рух механічної підсистеми поїзда [5], а також побудови для кожної типової ситуації оптимального, у необхідному сенсі, керування цим рухом, може бути вирішена задача синтезу абстрактного розімкнутого [6] термінального цілеспрямованого його примусу. Однак на практиці при розробці конструктивних систем такого примусу неминуче виникає проблема необхідності одночасного задоволення сукупності інженерних вимог, які пред'являються до якості зазначеного руху. Одним з засобів побудови оптимального керування у цьому випадку є запровадження векторних критеріїв, кожен із яких, у свою чергу, складається з низки вторинних

критеріїв, яким одночасно має задовольняти рух механічної підсистеми поїзда.

Аналіз викладеного свідчить про двоїстість керування, яке синтезоване виходячи з концепції гарантованого результату, і тому, у кожному режимі руху поїзда, оптимальне за деяким, у загальному випадку, векторним критерієм якості. З одного боку, таке керування, безсумнівно, має вищу якість, принаймні щодо зазначеного критерію, порівняно з примусом, синтезованим у виключно термінальній постановці. Однак, з іншого боку, побудова такого оптимального керування вимагає багаторазового, поєданого з процесом руху, оперативного вирішення ігрової мінімаксної задачі. Це, посилаючись, у загальному випадку, векторністю мінімізованого функціоналу і необхідністю вирішення підпорядкованої задачі ідентифікації об'єкта руху, пред'являє дуже високі вимоги до обчислювального, а також інших пристроїв регулятора, який здійснює синтез шуканого керування. Тому остаточне рішення щодо найбільш прийняттого, у кожній конкретній ситуації, типу стратегії формування примусового впливу на рух має прийматися з обов'язковим врахуванням реальних обмежень на характеристики керуючого пристрою, які визначаються, з одного боку, рівнем обов'язкових вимог до якості цього руху і, з іншого боку, технічними, економічними, а також іншими ресурсами, які можливо і доцільно витратити на створення цього пристрою.

III. МІСЦЕ РОЗТАШУВАННЯ РЕГУЛЯТОРА

Залежно від місця розташування регулятора, системи керування рухом поїзда поділяються [7] на стаціонарні та бортові. Стаціонарні системи мають такі привабливі властивості, як менша критичність до енергоспоживання, обчислювальної потужності керуючого комп'ютера, габаритів і ваги, більш легкі умови експлуатації (зниження рівня перешкод і збурень, менш гострий дефіцит оперативної інформації) та деякі інші (менш значущі). У той самий час, бортові системи, своєю чергою, мають підвищену автономність, набагато меншу інерційність і вищу точність, а також низку інших принципових переваг [8]. Завдяки цим властивостям, бортові системи, у багатьох випадках, очевидно, більш прийнятні у якості термінальних для керування рухом магнітолевітуючих поїздів. Виходячи з цього, у подальшому викладі можливі підходи до вирішення задачі синтезу термінального

керування зазначеним рухом конкретизуються стосовно систем бортового типу.

IV. ОБМЕЖЕННЯ КЕРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

При синтезі бортової термінальної системи керування рухом механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда, з метою зниження вимог щодо її надійності, ваги і так далі, доцільним є накладення деяких додаткових обмежень на свободу вибору керуючого пристрою. Практична прийнятність результатів згаданого синтезу значною мірою, очевидно, залежить від способу формалізації цих обмежень. Для бортових термінальних систем, у якості додаткових, найбільш зручними виявилися [9] обмеження по структурі системи, які визначаються, як правило, необхідною ємністю оперативної та довготривалої пам'яті керуючого пристрою, а також видом операцій, що ним реалізуються. Із загальної теорії керування випливає, що зменшення необхідної ємності оперативної пам'яті вимагає зниження кількості інформації, що переробляється регулятором при формуванні керуючого впливу. Ефективним же засобом обмеження необхідної ємності довгострокової пам'яті є скорочення загальної кількості змін параметрів алгоритму керування за весь час руху [9]. Нарешті, доцільним є прийняття, у якості допустимого типу операцій, що реалізуються згаданим керуючим пристроєм, арифметичних операцій, кількість яких заздалегідь обмежена.

V. ВИХІДНА ПОСТАНОВКА СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА

Результати аналізу викладених міркувань з імплементації бортових термінальних систем керування рухом механічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда свідчать про те, що спрямовані на таку імплементацію перспективні розробки повинні базуватися на багатовимірних розрахункових схемах об'єктів руху, які найбільш можливо більш точно відображають їхню структурно-функціональну організацію, а також ігрових мінімаксних методах синтезу такого руху, що гарантують його оптимальність по відношенню до критеріїв якості, що вводяться в широкому діапазоні режимів і цілей. У той же час, необхідність врахування наведених доцільних обмежень структури регуляторів, які використовуються, а також наявних технічних можливостей і економічної доцільності їх створення в сучасних умовах призводять до висновку про раціональність синтезу вихідної версії таких регуляторів у виключно термінальній постановці, виходячи з одномасової розрахункової схеми механічної підсистеми поїзда. Один із можливих підходів до вирішення задачі такого синтезу, ініційований викладеними міркуваннями, описаний нижче.

VI. МОДЕЛЮВАННЯ РУХА ПОЇЗДА

Для вивчення лише поздовжнього руху механічної підсистеми поїзда, в якості її розрахункової схеми приймемо матеріальну точку C , яка розташована, наприклад, у його голові і має масу m . Будь-який фізично реалізований керований рух цієї точки може, з використанням другого закону Ньютона, бути описаний рівнянням

$$m \cdot \ddot{\eta}(t) = F_n + F_c, \quad (1)$$

де $\eta(t)$ – відстань, яка пройдена точкою від початку спостереження вздовж кривої, паралельно зсунутої відносно осі путі, під впливом проекції на дотичну до згаданої кривої рівнодіючої природних збуджуючих F_n і керуючих F_c сил.

ПРОГРАМУВАННЯ СТАНУ МЕХАНІЧНОЇ ПІДСИСТЕМИ

При цьому рух зображуючої точки стану механічної підсистеми, яка розглядається, цілком конструктивно може бути представлений його програмою, складеною щодо узагальненої координати η [10] і відображає рух моделюючої точки C . Фізична сутність процесу, що розглядається, така, що закон $\ddot{\eta}(t)$ завжди є безперервною дійсною функцією свого аргументу. Тому, згідно з теоремою Вейерштрасса про рівномірне наближення безперервної функції багаточленами [11], згадана програма руху точки C може бути прийнята у вигляді

$$\ddot{\eta}(t) = E_i \cdot t^{(i)} \cdot e^i \forall i \in [\overline{0, j}], \quad (2)$$

де $E_i \forall i \in [\overline{0, j}]$ – коефіцієнти апроксимаційного полінома, що підлягають визначенню;

$e^i = [1, 1, \dots, 1]^T \forall i \in [\overline{0, j}]$ – одинична матриця-стовпець.

Значення $E_i \forall i \in [\overline{0, j}]$ мають бути визначені з крайових умов руху на його термінальному інтервалі $[t_s, t_f]$. Тому, для забезпечення однозначності цього визначення, в (2) приймемо

$$j = \rho + n - 1, \quad (3)$$

де $\rho = 2$ – прийнята розмірність фазового простору аналізованої підсистеми;

n – число обмежень, що накладаються на її кінцевий стан.

В реальних умовах експлуатації механічної підсистеми поїзда $n \in [\overline{0, 2}]$. Тобто, протягом термінального проміжку часу $\tau = t_f - t_s$, може знадобитися забезпечити задану зміну координати, швидкості та прискорення об'єкта руху від значень $\eta_s, \dot{\eta}_s, \ddot{\eta}_s$ до значень $\eta_f, \dot{\eta}_f, \ddot{\eta}_f$. При $n = 2$, згідно з (3), $j = 3$ і, в записі для термінального моменту $t = t_f$, розгорнута форма виразу (2) набуває вигляду

$$\ddot{\eta}_f = E_0 + E_1 \cdot \tau + E_2 \cdot \tau^{(2)}. \quad (4)$$

Послідовно інтегруючи останній вираз за часом, для того ж моменту $t = t_f$ отримуємо

$$\dot{\eta}_f = \dot{\eta}_s + E_0 \cdot \tau + E_1 \cdot \frac{\tau^{(2)}}{2} + E_2 \cdot \frac{\tau^{(3)}}{3};$$

$$\eta_f = \eta_s + \dot{\eta}_s \cdot \tau + E_0 \cdot \frac{\tau^{(2)}}{2} + E_1 \cdot \frac{\tau^{(3)}}{6} + E_2 \cdot \frac{\tau^{(4)}}{12}. \quad (5)$$

З рішення системи рівнянь (4) та (5), вирази для визначення значень шуканих коефіцієнтів E_0, E_1, E_2 можуть бути отримані у вигляді

$$E_0 = -\frac{12}{\tau^{(2)}} \cdot (\eta_s - \eta_f) - \frac{6}{\tau} \cdot (\dot{\eta}_s + \dot{\eta}_f) + \ddot{\eta}_f;$$

$$E_1 = \frac{48}{\tau^{(3)}} \cdot (\eta_s - \eta_f) + \frac{1}{\tau^{(2)}} \cdot (18 \cdot \dot{\eta}_s + 30 \cdot \dot{\eta}_f) - \frac{6}{\tau} \cdot \ddot{\eta}_f;$$

$$E_2 = -\frac{36}{\tau^{(4)}} \cdot (\eta_s - \eta_f) - \frac{12}{\tau^{(3)}} \cdot (\dot{\eta}_s + 2 \cdot \dot{\eta}_f) + \frac{6}{\tau^{(2)}} \cdot \ddot{\eta}_f. \quad (6)$$

Підстановкою у них значень $\tau, \eta_s, \eta_f, \dot{\eta}_s, \dot{\eta}_f$, а також $\ddot{\eta}_f$, необхідних на кожному з термінальних інтервалів руху підсистеми, можуть бути отримані і конкретні чисельні значення цих аппроксимаційних коефіцієнтів.

Необхідні програми зміни фазових координат зображуючої точки стану механічної підсистеми поїзда на термінальному інтервалі τ можуть бути отримані з виразів (5) шляхом заміни в них значення цього інтервалу значенням поточного часу t . Ці програми мають вигляд

$$\dot{\eta}(t) = \dot{\eta}_s + E_0 \cdot t + E_1 \cdot \frac{t^{(2)}}{2} + E_2 \cdot \frac{t^{(3)}}{3};$$

$$\eta(t) = \eta_s + \dot{\eta}_s \cdot t + E_0 \cdot \frac{t^{(2)}}{2} + E_1 \cdot \frac{t^{(3)}}{6} + E_2 \cdot \frac{t^{(4)}}{12}. \quad (7)$$

З використанням цих співвідношень, можуть будуватися як програмні фазові траєкторії руху зазначеної зображуючої точки, так і графіки функціональних залежностей від часу її програмних фазової координати і швидкості. Тому рівності (7), що визначають алгоритм керування станом

досліджуваної підсистеми, були прийняті як алгоритмічна основа програмного комплексу, який реалізує таку побудову. Елементи комплексу програмно фіксовані на вхідній мові системи комп'ютерної математики Mathematica та поділяються на “розрахункову” та “графічну” частини. Перша з цих частин виконує необхідні розрахунки, а друга – перетворює їхні результати в графічну форму.

Аналіз отриманих результатів побудови програмних термінальних рухів механічної підсистеми поїзда дозволяє зробити висновок про те, що, з використанням розробленої методики, така побудова успішно здійснена у випадках, що відповідають різним експлуатаційним режимам.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] J. Gou. Development Status and Global Competition Trends Analysis of Maglev Transportation Technology Based on Patent Data. *Urban Rail Transit*. 2018. Vol. 4. Pp. 117–129. URL: <https://doi.org/10.1007/s40864-018-0087-3>.
- [2] L. Zhendong, S. Stichel, and M. Berg. Overview of technology and development of maglev and hyperloop systems. Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2022.
- [3] K. Nagashima, and T. Sasakawa. Research and Development of Maglev and Application of Related Technologies to Conventional Railways. *QR of RTRI*. 2021. Vol. 62(3). Pp. 163–166.
- [4] R. E. Bellman. Adaptive control processes. New Jersey : Princ. Univ. Press, 1961.
- [5] Поляков В. А. Приспособляемость движения железнодорожного поезда. *Динамика поезда и подвижного состава железных дорог* : межвуз. сб. научн. тр. Днепропетровск : ДИИТ, 1990. С. 107–117.
- [6] Блохин Е. П., Поляков В. А. Целенаправленное движение железнодорожного поезда. *Нагруженность и надёжность механических систем* : сб. научн. тр. Киев : Наук. думка, 1987. С. 76–83.
- [7] Ерофеев Е. В. Принципы построения систем автоведения поездов метрополитена и пассажирских поездов при электрической тяге : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е. В. Ерофеев – Москва, 1985. 42 с.
- [8] Петров Б. Н., Портнов-Соколов Ю. П., Андриенко А. Я., Иванов В. П. Бортовые терминальные системы управления: Принципы построения и элементы теории. Москва : Машиностроение, 1983. 200 с.
- [9] Ротач В. Я. Теория автоматического управления. Москва : Изд-во МЭИ, 2004. 400 с.
- [10] Коренев Г. В. Очерки механики целенаправленного движения. Москва : Наука, 1980. 192 с.
- [11] Ильин В. А., Садовничий В. А., Сендов Бл. Х. Математический анализ. Продолжение курса / под ред. А. Н. Тихонова. Москва : Изд-во МГУ, 1987. 358 с.

Оптимізація процесу отримання коагулянту засобами машинного навчання

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.076>

Андрій Сафоник

Навчально-науковий інститут енергетики,
автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Владислав Данченков

Навчально-науковий інститут енергетики,
автоматики та водного господарства
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
danchenkov_ak20@nuwm.edu.ua

Анотація—Оптимізовано процес отримання коагулянту в системі біологічного очищення стічних вод із залученням машинного навчання та нейронних мереж. Наведено експериментальні дані відповідності між параметрами навчання та алгоритм їх отримання.

Ключові слова—нейронні мережі; машинний зір; очищення води; моделювання; оптимізація процесу; RGB; HSL.

I. ВСТУП

Вода має особливе значення для людства. Вона є не лише життєво важливою речовиною для будь-якого живого організму, а й залучена до всіх індустріальних сфер. Попри цей факт, питання чистої води досі є невирішеним. Очисні потужності світу наразі не здатні забезпечити темпи співрозмірні до темпів забруднення. Ці обставини виводять тему очистки води на перші позиції за важливістю в науковій спільноті.

Ефективна очистка стічної води є достатньо комплексним процесом. Такої риси процес очистки набуває під впливом багатьох чинників: постійної зміни складу (за рахунок стоків побутового, індустріального та природного походження), широкого ряду забруднюючих речовин (від органічних матеріалів та патогенів до тяжких металів), потреби в повсякчасному адаптивному регулюванні за витратою активних речовин та енерговитратами, наміру підтримання комфортного середовища біологічної складової технологічного ланцюга для її довговічності. Всі наведені властивості системи повинні регулюватися наближено до усталеного значення. Проблематичність цього регулювання полягає в нелінійній залежності властивостей водного середовища в процесі очистки. Через комплексність проблеми такого регулювання доцільним є інтеграція до системи штучних нейронних мереж.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Побудова фактичних технологічних об'єктів відбувається в декілька етапів. Окрім побудови мініатюрних версій технологічних об'єктів, необхідним етапом у проектуванні є також і

перевірка справності теоретичної моделі об'єкта на злагодженість внутрішніх взаємодій у системі.

Застосування штучних нейронних мереж для різних процесів на сьогоднішній день надзвичайно актуально. Їх особливістю є можливість створення системи, що описує модель поведінки, що може не прив'язуватися до звичних математико-фізичних залежностей.

Як було наголошено, процес очистки води є комплексним процесом, що має враховувати декілька характеристик водночас. Давачі концентрації є специфічними, адже розробляються за окремим технологічним процесом для кожної комбінації речовини та середовища поширення. Також, якщо говорити про агресивне середовище, такі давачі не завжди є до нього стійкими. У такому випадку є доцільним використання фотоколориметричний метод вимірювання. Він ґрунтується на факті, що вода змінює забарвлення відповідно до її вмісту. За цим забарвленням можна оцінювати й вміст спостережуваної речовини в середовищі [1].

Для проведення оцінки оптимальності створеного концепту було обрано MATLAB, як засіб моделювання його функціонування. Основні складові процесу оцінки включали використання Curve Fitter та Neural Network Toolbox. Для досягнення високої точності регулювання, контрольований параметр повинен мати залежність, що слідує простій математичній функції, тобто повинен бути апроксимованим. Саме з огляду на такий підхід до регулювання було залучено Curve Fitter для вирішення цієї складової задачі. Цей модуль дозволяє обрати математичну залежність із зазначеного набору та зрозуміти, чи здатна вона достатньо точно описати вибірку, або ж обрана залежність має певні відхилення. Через наявну кількість експериментальних точок, необхідно розширити вибірку. Оскільки залежність ступеневі функції практично повністю описує розподіл експериментальних значень, то це позитивно вплине на результати навчання мережі.

Для проведення оцінки оптимальності створеного концепту було обрано MATLAB, як засіб

моделювання його функціонування. Основні складові процесу оцінки включали використання Curve Fitter та Neural Network Toolbox. Для досягнення високої точності регулювання, контрольований параметр повинен мати залежність, що слідує простій математичній функції, тобто повинен бути апроксимованим. Саме з огляду на такий підхід до регулювання було залучено Curve Fitter для вирішення цієї складової задачі. Цей модуль дозволяє обрати математичну залежність із зазначеного набору та зрозуміти, чи здатна вона достатньо точно описати вибірку, або ж обрана залежність має певні відхилення. Через наявну кількість експериментальних точок, необхідно розширити вибірку. Оскільки залежність степеневої функції практично повністю описує розподіл експериментальних значень, то це позитивно вплине на результати навчання мережі.

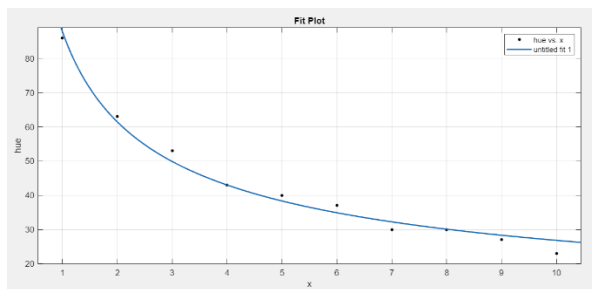


Рисунок 1. Апроксимація розподілу значень концентрації

MATLAB дозволяє автоматично виконувати табуляцію функції та зберігати отримані значення.

Neural Network Toolbox – це блок машинного навчання в MATLAB. Цей блок пропонує моделювання, експорт, а також роботу з нейронною мережею. Для його функціонування необхідно внести отриману вибірку даних із Curve Fitter за обраної опції Fitting. Будь-яка нейронна мережа повинна мати вхідні та вихідні параметри, за якими вона встановлює статистичну відповідність. У даному випадку, відповідність формується між спостережуваним відтінком кольору та концентрацією. Одні кольорові простори сприймаються нейронними мережами краще за інші. Тож, для потреб ефективності навчання нейронної мережі представляється в просторі HSL [2]. Переведення в даний кольоровий простір відбувається за наступними формулами [3][4]:

$$R' = \frac{R}{255}$$

$$C_{max} = \max(R', G', B')$$

$$C_{min} = \min(R', G', B')$$

$$\Delta = C_{max} - C_{min}$$

$$H = \begin{cases} ((G' - B')/\Delta) + 6, C_{max} = R' \\ ((B' - R')/\Delta) + 2, C_{max} = G' \\ ((R' - G')/\Delta) + 4, C_{max} = B' \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0, \Delta = 0 \\ \Delta/(1 - |2L - 1|), \Delta \neq 0 \end{cases}$$

$$L = (C_{max} + C_{min})/2$$

ТАБЛИЦЯ 1. ТАБЛИЦЯ ПРЕДСТВЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ СПЕКТРУ RGB В ПРОСТОРІ HSL

Проба, №	Кольоровий простір RGB			Концентрація Мг * дм ⁻³
	Червоний	Зелений	Синій	
1	204	207	200	0.8
2	214	215	193	1.1
3	211	194	75	3.7
4	220	173	54	4.5
5	210	155	49	6.3
6	215	147	41	6.9
7	193	116	38	9.1
8	189	111	33	9.6
9	188	100	27	11.8
10	178	74	11	12.6

ТАБЛИЦЯ II. ВІДПОВІДНІСТЬ ДАНИХ КОЛЬОРУ ЗА КОНЦЕНТРАЦІЮ В ПРОСТОРІ RGB ТА HSL

Проба, №	Кольоровий простір RGB			Кольоровий простір HSL		
	Червоний	Зелений	Синій	Відтінок, °	Насиченість, %	Яскравість, %
1	204	207	200	86	6.8	79.8
2	214	215	193	63	21.6	80
3	211	194	75	53	60.7	56.1
4	220	173	54	43	70.3	53.7
5	210	155	49	40	64.1	50.8
6	215	147	41	37	68.5	50.2
7	193	116	38	30	67.1	45.3
8	189	111	33	30	70.3	43.5
9	188	100	27	27	74.9	42.2
10	178	74	11	23	88.4	37.1

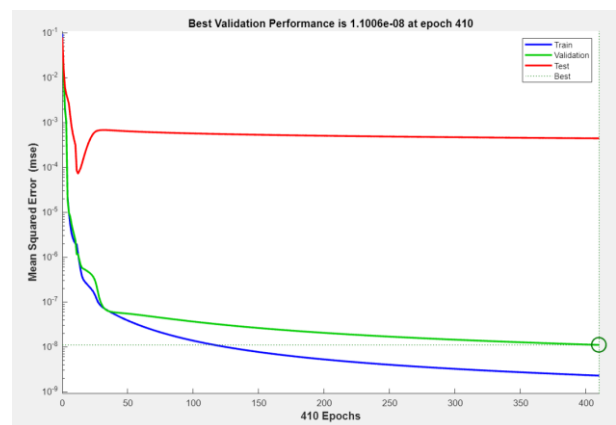


Рисунок 2. Результат тренування мережі за даними таблиці 2

III. ВИСНОВКИ

Дані наведені в таблиці 2 встановлені експериментально [5]. Ці дані відповідають закономірностям фотоколориметрії, тобто концентрація є прямопропорційною до насиченості відтінку. В процесі експерименту було використано значення не однопроменевого, а саме двопроменевого фотоколориметра, адже це сприятливо впливає на точність вимірювання [6].

ЛІТЕРАТУРА

- [1] А. Сафоник, І. Грицюк, М. Міщанюк, І. Ільків, Інформаційна система електрохімічного отримання коагулянту на основі фотоколориметричного аналізу. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2021. Vol. 1. Pp. 97–104. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2021-67-1-14>
- [2] A.P. Safonyk, I.M. Hrytsiuk, M.M. Mishchanchuk, and I.V. Ilkiv. Hardware and software system for determination of iron in coagulants based on spectrophotometric analysis. *Електрон. Моделювання*. 2021. Vol. 43(4). Pp. 89–104. URL: <https://www.emodel.org.ua/en/archive/2021/43-4/43-4-6>
- [3] A. Sultanov. Converting Between Color Models. [Online]. URL: <https://medium.com/swlh/converting-between-color-models-5cb7e2d12e10> (Accessed: October 18, 2023).
- [4] RGB to HSL converter | color conversion (rapidtables.com). [Online]. URL: <https://www.rapidtables.com/convert/color/rgb-to-hsl.html> (Accessed: October 18, 2023).
- [5] A. Safonyk, I. Hrytsiuk, M. Klepach, M. Mishchanchuk, and A. Khrystyuk. Development of an automated system for electrochemical production of coagulant based on photocolourimetric analysis. *Journal of water and land development*. 2022. Vol. 52 (I–III). Pp. 75–80. URL: <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139946>
- [6] ФОТОКОЛОРИМЕТРИЯ | Фармацевтична енциклопедія (pharmencyclopedia.com.ua). [Online]. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/432/fotokolorimetriya> (Accessed: October 18, 2023).

Розпізнавання безпілотних літальних апаратів типу Shahed-136 по акустичній сигнатурі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.077>

Олексій Сечко

Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Національний університет «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
sechko.a@gmail.com

Антон Кіцера

Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Національний університет «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
antonkitsera@gmail.com

Роман Кочан

Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Національного університету «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
roman.v.kochan@lpnu.ua

Анотація—В дослідженні розглядається розробка конволюційної нейронної мережі для виявлення та класифікації типів літальних апаратів. З урахуванням зростаючого використання безпілотних літальних апаратів, створення ефективних систем виявлення стає все більш критичним. Дослідження включає опис та процес створення та навчання нейронної мережі, підготовка датасету для навчання. Основний акцент зроблено на розробці та тестуванні нейронної мережі для класифікації звуків.

Ключові слова—дрони-камікадзе; акустичні сенсори; розпізнавання звуків; штучні нейронні мережі.

I. ВСТУП

1.1. Актуальність теми

Виявлення та розпізнавання літальних апаратів є необхідним етапом захисту від засобів повітряного нападу. Війни сучасності характеризуються широким використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як для розвідки, так і для безпосереднього враження. Дальність дії сучасних БПЛА лежить в межах від кілометрів – для виконання тактичних задач і до тисячі кілометрів – для виконання стратегічних. Традиційні засоби виявлення літальних апаратів, що базуються на мережі радіолокаційних станцій які забезпечують моніторинг повітряного простору, мають осередковий характер через малу дальність виявлення цілей типу БПЛА [1] і відносно малу їхню кількість [2–7]. Для підвищення спроможностей військ протиповітряної оборони з виявлення мало висотних цілей було розроблено систему «Звук» [8], що забезпечує виявлення повітряних цілей за аналізом акустичних сигналів, що генеруються їхніми двигунами. Ця система складається з множини мікрофонів розподілених по території України, що забезпечують моніторинг та аналіз акустичних сигналів, а результати передаються на командний пункт. Заявлена дальність виявлення крилатих ракет складає 7 км, а

БПЛА – 3 км. Недоліком системи є те, що її мікрофони є фактично детекторами наявності цілі в радіусі дії мікрофонів, тому похибка кожного мікрофону – рівна дальності його дії, що недостатньо для управління мобільними вогневими групами через малу ефективну дальність зенітних кулеметів якими вони озброєні.

Отже, актуальною є проблема розробки та впровадження точніших засобів виявлення і супроводження засобів повітряного нападу, особливо безпілотних літальних апаратів.

1.2. Завдання дослідження

Серед цілого спектру безпілотників, дрон типу Shahed-136 [9] виявився одним з найбільш затребуваних і потенційно небезпечних для України в умовах поточного конфлікту. Його висока маневреність, здатність долати великі відстані та висока маса бойової частини робить його загрозою для об'єктів атаки, що можуть бути розташовані на всій території України.

Основною ціллю цього дослідження є розробка ефективного методу розпізнавання дронів типу Shahed-136 на основі їх акустичної сигнатури. Цей метод планується впровадити в акустичну систему виявлення дронів, що розробляється на кафедрі спеціалізованих комп'ютерних систем Національного університету «Львівська політехніка» [10].

II. АКУСТИЧНА РОЗПІЗНАВАЛЬНА СИСТЕМА

Акустична розпізнавальна система, заснована на принципах машинного навчання (ML), є сучасним інструментом для автоматичного виявлення, аналізу та класифікації звукових сигналів. Ці системи можуть виявляти та відрізняти різноманітні джерела звуку, включаючи, наприклад, голоси, музичні інструменти, звуки природи, транспортні засоби, а також специфічні звуки, такі як акустичні сигнатури безпілотних літальних апаратів.

Основні компоненти та характеристики:

- Сенсори: мікрофони для збору акустичних даних з оточуючого середовища.
- Попередня обробка: Процедури фільтрації та підсилення звуку для підготовки даних до аналізу.
- Виділення ознак: Виділення ключових характеристик звукового сигналу, таких як спектральні компоненти, часові характеристики тощо.
- Моделі машинного навчання: Використання алгоритмів машинного навчання, таких як нейронні мережі, опорні вектори машин та інші, для класифікації акустичних сигнатур на основі навчального набору даних.
- Навчальний набір даних: Зібрані та марковані акустичні записи, які використовуються для тренування моделі ML.
- Реальний час: Більшість сучасних акустичних розпізнавальних систем може працювати в реальному часі, швидко виявляючи та класифікуючи вхідні звукові сигнали.
- Інтеграція: Можливість інтеграції з іншими системами безпеки, такими як радіолокаційні системи, системи відеоспостереження тощо.

Використання машинного навчання в акустичних розпізнавальних системах відкриває широкі можливості для підвищення точності та швидкості розпізнавання звуків, що робить цю технологію надзвичайно актуальною в різних сферах застосування.

III. РОЗРОБКА ТА ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1. Опис нейронної мережі

Розроблена нейронна мережа базується на архітектурі глибокого навчання та оптимізована для аналізу акустичних сигнатур. Вона складається з декількох шарів, які відповідають за виявлення ключових особливостей звукових хвиль. Завдяки тренуванню на підготовленому наборі даних, мережа здатна розрізняти сигнатури різних літальних апаратів, зокрема типу Shahed-136.

3.2. Підготовка набору

Підготовка даних є головним етапом у будь-якому процесі машинного навчання. Починаючи зі збору даних, було отримано множину вхідних даних з різноманітних джерел, включаючи записи звуків. Забезпечення якості даних було наступним кроком: важливо, щоб дані були достатньо репрезентативними, збалансованими, записаними при різних умовах.

Процес очищення даних включав в себе видалення зайвих артефактів, корекцію помилок та заповнення відсутніх значень. Після цього дані було трансформовано: проведено нормалізацію, стандартизацію та кодування категоріальних даних.

Витягування ознак дозволило виділити ключові характеристики звукових записів, такі як спектрограми або MFCC [11].

Розділення даних на навчальний, валідаційний та тестовий набори допомогло забезпечити коректність подальшого навчання моделі. Щоб збільшити різноманітність даних та підвищити їхню якість, було застосовано аугментацію. Така детальна підготовка даних забезпечує найкращі умови для навчання ефективної моделі нейронної мережі.

Конволюційна нейронна мережа (CNN) [12] складається з двох шарів глибокої роздільної конволюції (Depthwise Separable Conv2D) з 8 фільтрами та активацією ReLU, розташованих між двома шарами максимального пулінгу. Після цього йде шар "Flatten", який перетворює багатовимірну матрицю в одновимірний масив. Далі йдуть два повноз'язних шари: перший з 8 нейронами і ReLU активацією, а другий з одним нейроном і сигмоїдною активацією для бінарної класифікації. Модель оптимізована для ефективного використання ресурсів та параметрів.

Дана версія нейронної мережі навчалась лише 10 епох на близько 9000 прикладах. Де близько 1000 є записами роботи двигуна та прольоту Шахіду, та інші 8000 звуки міста, лісу та інше.

3.3. Тестування розробленої мережі

Після завершення процесу навчання розробленої нейронної мережі було проведено її тестування на окремому тестовому наборі даних. Цей етап є критично важливим для оцінки реальної ефективності моделі та її здатності генералізувати навчання на нових даних. Для візуалізації результатів тестування було створено графіки:

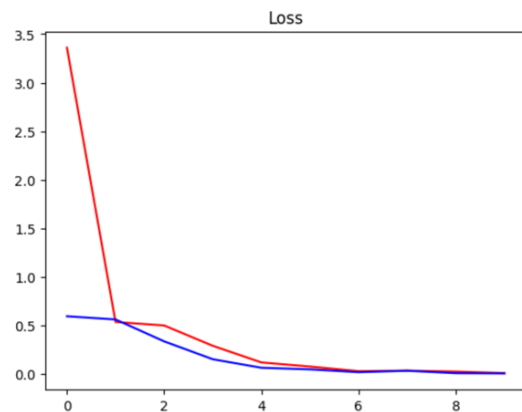


Рисунок 1. Відображає динаміку зміни функції втрат (Loss) протягом навчання

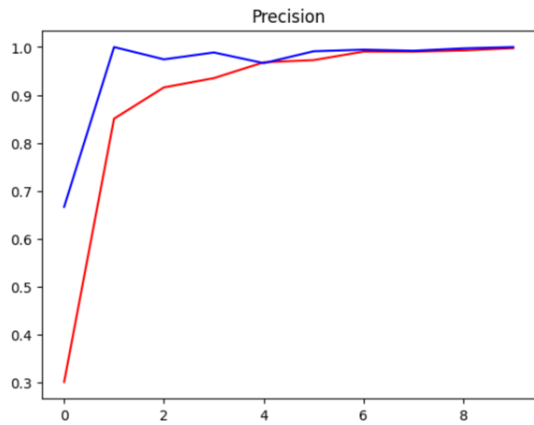


Рисунок 2. Показує точність моделі (Precision), яка характеризує відсоток правильно розпізнаних позитивних випадків від загальної кількості позитивних прогнозів

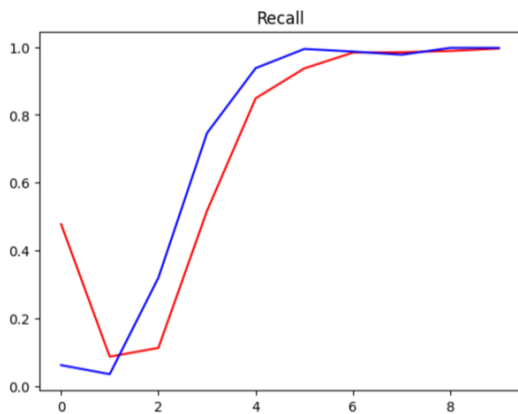


Рисунок 3. Відображає показник повноти (Recall), що демонструє відсоток правильно розпізнаних позитивних випадків від усіх дійсно позитивних випадків

На рисунку 1 ми бачимо відношення Loss або ж «навчальна втрата» між тренувальним (червоний) та валідаційним (синій) сетами. Якщо ці два показники зменшуються та йдуть до 0 – це означає, що навчання є ефективним. Якщо одна з ліній йде до 0, а інша росте – це може свідчити про «перенавчання» або «недонавчання».

На рисунку 2 ми бачимо відношення Precision або ж «точність» між тренувальними (червоний) та валідаційним (синій) сетами. Для зменшення помилково позитивних результатів потрібно зосередитись на максимальній точності. В даному випадку, точність прямує до 1, що означає ефективне навчання.

На рисунку 3 ми бачимо відношення Recall або «відгук» між тренувальними (червоний) та валідаційним (синій) сетами. Відгук – це міра того, наскільки багато із реальних позитивних випадків було правильно ідентифіковано моделлю. В даному випадку, відгук прямує до 1, що означає мінімальну кількість некоректно ідентифікованих даних.

Аналіз цих графіків допомагає оцінити якість розробленої моделі та визначити потенційні напрямки її оптимізації.

Перевірка розробленої нейронної мережі на звукових файлах які не використовувались в процесі навчання моделі. Даний звуковий файл є звуком Шахиду без фільтрів, наближено до реальних умов.

```
[17]: yhat_test = [1 if prediction > 0.5 else 0 for prediction in yhat]
      print(yhat_test)
      yhat
      [1, 1]
[17]: array([[0.9999991 ],
            [0.99944603]], dtype=float32)
```

Рисунок 4. Приклад запуску моделі на записі Шахиду

На рисунку 4 ми бачимо результат роботи моделі нейронної мережі на звуку, який не приймав участь в навчанні. Відсоток що звук на 2 записах є роботою двигуна Шахиду - 99%. На даному записі добре чути проліт дрону.

Для демонстрації роботи моделі на інших звуках, взятий запис роботи двигуна та вихлопу звичайного мотоциклу, без використання фільтрів для наближення до реального використання.

```
yhat_test = [1 if prediction > 0.5 else 0 for prediction in yhat]
print(yhat_test)
yhat
[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
array([[5.37481060e-10],
       [3.17109006e-08],
       [7.68815457e-22],
       [1.00966535e-11],
       [7.16951672e-13],
       [5.79267808e-13],
       [1.84822042e-08],
       [5.49940253e-03],
       [4.73691521e-14],
       [5.26187133e-14],
       [2.41003733e-08],
       [3.26749841e-07]], dtype=float32)
```

Рисунок 5. Приклад запуску моделі на записі мотоциклу

На рисунку 5 ми бачимо результат запуску мережі на записі, де присутній звук роботи двигуна мотоциклу та вихлопної системи. Запис має довжину близько 1хв, то ж для зручності вже поділили на менші відрізки. Отже нейрона мережа визначила відсоток того, що на записі присутній Шахид – мінімальний.

IV. ВИСНОВКИ

Розроблена нейронна мережа виявилася ефективним інструментом у задачах класифікації акустичних сигнатур літального апарату типу Shahed-136. Після ряду тренувань та оптимізації, мережа показала високу точність розпізнавання, що забезпечує надійність її результатів. Це важливо, особливо в умовах, коли швидке та точне розпізнавання може бути критично важливим для безпеки.

Додатково, завдяки її адаптивності та гнучкості, ця нейронна мережа може бути інтегрована безпосередньо на сенсори виявлення. Така інтеграція забезпечує оперативну реакцію на потенційні загрози та дозволяє системам оборони вчасно реагувати на зближення або проникнення літальних апаратів у критичні зони. Враховуючи потенціал та можливості цієї нейронної мережі, вона може стати ключовим компонентом у сучасних системах повітряної оборони.

Враховуючи успішність розробленої нейронної мережі, ми бачимо великий потенціал для її подальшого вдосконалення та адаптації до різних умов роботи. Особливо цікавими є дослідження її ефективності у взаємодії з іншими системами розпізнавання. Також важливо розширити діапазон розпізнаваних акустичних сигнатур, включаючи нові типи дронів та літальних апаратів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Климченко В. Й., Дончак Д. А., Донченко М. М., Тютюнник В. О. Проблеми набуття спроможностей радіотехнічних військ з розвідки перспективних засобів повітряного нападу. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2021. Вип. 3(44). С. 108–115.
- [2] Радіотехнічні війська України. URL: https://profilbaru.com/uk/Радіотехнічні_війська_України. (Accessed: October 16, 2023).
- [3] 14-та радіотехнічна бригада (Україна). [Online]. URL: [https://profilbaru.com/uk/14-та_радіотехнічна_бригада_\(Україна\)#Структура](https://profilbaru.com/uk/14-та_радіотехнічна_бригада_(Україна)#Структура). (Accessed: October 16, 2023).
- [4] 138-ма радіотехнічна бригада (Україна). [Online]. URL: [https://profilbaru.com/uk/138-ма_радіотехнічна_бригада_\(Україна\)#Структура](https://profilbaru.com/uk/138-ма_радіотехнічна_бригада_(Україна)#Структура). (Accessed: October 16, 2023).
- [5] 164-та радіотехнічна бригада (Україна). [Online]. URL: [https://profilbaru.com/uk/164-та_радіотехнічна_бригада_\(Україна\)#Структура](https://profilbaru.com/uk/164-та_радіотехнічна_бригада_(Україна)#Структура). (Accessed: October 16, 2023).
- [6] 1-ша радіотехнічна бригада (Україна). [Online]. URL: [https://profilbaru.com/uk/1-ша_радіотехнічна_бригада_\(Україна\)](https://profilbaru.com/uk/1-ша_радіотехнічна_бригада_(Україна)). (Accessed: October 16, 2023).
- [7] Худов Г. В., Бакуменко Б. В., Боровий В. І. та ін. Тактика радіотехнічних військ : навч. посіб. Харків : ХНУПС, 2018. 240 с.
- [8] Айтїшники, які нині служать у ЗСУ, створили систему «Звук» для виявлення російських дронів і ракет. Як це працює. [Online]. URL: <https://dev.ua/news/antydron-1674209666>. (Accessed: October 16, 2023).
- [9] Росіяни атакують міста дронами "Герань-2": що це таке і як збити безпілотник (фото). [Online]. URL: <https://focus.ua/uk/voennoye-novosti/533239-rossiyane-atakuyut-goroda-dronami-geran-2-chto-eto-takoe-i-kak-sbit-besplotnik-foto>. (Accessed: October 16, 2023).
- [10] Р. В. Кочан, Н. Є. Гоц, Л. Д. Озірковський та ін. Концепція акустичної системи виявлення дронів. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ* : тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 17–18 травня 2023 р.). Львів : НАСВ, 2023. С. 77–78.
- [11] Intuitive understanding of MFCCs. The mel frequency cepstral coefficients... [Online]. URL: <https://medium.com/@derutyosl/intuitive-understanding-of-mfccs-836d36a1f779>. (Accessed: October 16, 2023).
- [12] CNNs for Audio Classification. A primer in deep learning for audio... [Online]. URL: <https://towardsdatascience.com/cnns-for-audio-classification-6244954665ab>. (Accessed: October 16, 2023).



РОБОТОТЕХНІКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КЕРУВАННЯ

Implementation of model predictive control in a programmable logic controller

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.078>

Yurii Mariiash

Department of Automation of Energy Processes
National Technical University of Ukraine “Igor
Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine
y.mariash@kpi.ua

Oleksandr Stepanets

Department of Automation of Energy Processes
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine

Abstract—The article is aimed at the development of modern automatic control systems, which should provide high-performance indicators in the conditions of variable operating modes of industrial equipment due to effective control structures and algorithms. The purpose of the study is to reduce the cost of the basic oxygen furnace steel, which is a consequence of the increase in the share of scrap metal due to the enhanced post-burning of CO to CO₂ in the cavity, by optimal controlling the duty mode parameters using model-predictive control. The blowing mode of the basic oxygen furnace was considered as a technological object of control, and the problem of controlling blowing parameters in conditions of non-stationarity of the rate of metal decarburization was analyzed. The use of a model-predictive controller made it possible to improve the quality of control for the oxygen flow circuit by 39% and the maximum dynamic deviation of the CO₂ content in the gases was reduced by 16.5% compared to the PID control. The implementation of a software-hardware control system using model-predictive control based on a programmable logic controller is considered.

Keywords—model-predictive control, basic oxygen furnace, quadratic functional, state space model, control algorithm.

I. INTRODUCTION

The modern basic oxygen furnace (BOF) process is a high-tech and automated production equipped with a large amount of measurement and control devices. In the current conditions of metallurgical production development, the tasks of developing resource-saving steel smelting technologies, theoretical and practical aspects of new energy-saving blowing methods, and increasing the efficiency of heat energy utilization are relevant [1]. In manual control, the blowing process often deviates from the optimal, disrupting the slag formation process, resulting in either reversion or foaming of the slag, leading to carryovers and emissions. Only 45–50% of melts, and sometimes even less, are produced successfully on the first attempt under manual control [2]. Important parameters of the blowing mode include blowing intensity, the height of the lance above the level of the calm bath, penetration depth, pressure, and quantity of oxygen jets [3]. The goal of BOF control is to obtain metal with a specific chemical composition and temperature at the end of the blowing process. However, direct measurement of these parameters during blowing is impossible due to the

absence of suitable sensors that can operate in BOF conditions [4]. In such case the application of control algorithms that allow the process to be conducted under optimal conditions is relevant.

II. SETTING OBJECTIVES

The aim of the work is to implement optimal control of the blowing parameters using model predictive control (MPC) based on a programmable logic controller (PLC), which will increase the share of scrap metal by increasing the state of CO combustion to CO₂ in the converter cavity.

III. CONTROLLER DESIGN AND IMPLEMENTATION

A model-predictive control (MPC) with a quadratic functional was synthesized taking into account the constraints of the BOF smelting mode. The development of the model-predictive controller consists of the following main stages: building a predictive model, determining the performance index characterizing the regulation quality, solving the optimization problem – finding the optimal control strategy that minimizes the performance index. To construct the predictive model of the MPC, we will use the mathematical model of the oxygen converter smelting mode [5]. For the automatic control system of the oxygen converter smelting process the problem of program control and stabilization in the presence of disturbances is considered, so it is necessary to switch to the incremental form (1) of the predictive model in the state space:

$$\begin{aligned} \Delta u(t) &= u(t) - u(t-1) \Rightarrow u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \\ x'(t) &= Ax(t) + Bu(t-1) + B\Delta u(t), \end{aligned} \quad (1)$$

where $u(t)$ – control action; $x(t)$ – process state; A, B – state space matrix.

To do this, we will introduce a new state variable and extend the system (2):

$$\begin{cases} x'(t) = Ax(t) + Bu(t-1) + B\Delta u(t) \\ x'_u(t) = x_u(t) + \Delta u(t). \end{cases} \quad (2)$$

As a result, a predictive model (3) of the oxygen converter smelting process blowing mode was obtained in the form of a controlled canonical state-space model:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x'(t) \\ x'_u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_u(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} \Delta u(t) \\ y(t) = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_u(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (3)$$

The transformation of the continuous model (3) into a discrete model (4) in state space was performed using the Euler method [6]:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \\ x_5(k+1) \\ x_6(k+1) \\ x_u(k+1) \\ x_H(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \\ x_u(k) \\ x_H(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d \\ I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{vO_2}(k) \\ \Delta H(k) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v(k) \\ \gamma_{CO_2}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \\ x_u(k) \\ x_H(k) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (4)$$

As a result, new matrices (5) of the controlled canonical discrete state-space model were obtained:

$$\bar{A}_d = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_0}{T_v^{uO_2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T_0}{T_v^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 1 & T_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T_0}{T_{1\gamma_{CO_2}}^{uO_2}} & -\frac{T_0 T_{2\gamma_{CO_2}}^{uO_2}}{T_{1\gamma_{CO_2}}^{uO_2}} & 1 - \frac{T_0 T_{2\gamma_{CO_2}}^{uO_2}}{T_{1\gamma_{CO_2}}^{uO_2}} & 0 & 0 & \frac{T_0}{T_{1\gamma_{CO_2}}^{uO_2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{T_0}{T_{1\gamma_{CO_2}}^H} & 1 - \frac{T_0 T_{2\gamma_{CO_2}}^H}{T_{1\gamma_{CO_2}}^H} & 0 & \frac{T_0}{T_{1\gamma_{CO_2}}^H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \bar{B}_d = \begin{bmatrix} \frac{T_0}{T_v^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{T_0}{T_{1\gamma_{CO_2}}^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{T_0}{T_{1\gamma_{CO_2}}^H} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \bar{C}_d = \begin{bmatrix} k_v^{uO_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{\gamma_{CO_2}}^{uO_2} & 0 & 0 & k_{\gamma_{CO_2}}^H & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

where

$$k_{\gamma_{CO_2}}^H = 12,15\%/m; k_v^{uO_2} = 6m^3/(\text{min} \cdot \%);$$

$$k_{\gamma_{CO_2}}^{uO_2} = -0,756\%/CO_2; \%$$

$$T_0 = 0,1s; T_v^{uO_2} = 1,2s; T_{1\gamma_{CO_2}}^{uO_2} = 9,55s;$$

$$T_{2\gamma_{CO_2}}^{uO_2} = 14,98s; T_{3\gamma_{CO_2}}^{uO_2} = 7,05s;$$

$$T_{1\gamma_{CO_2}}^H(\tau) = T_v^H T_{\gamma_{CO_2}}^{v_c} = 15,16 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-3,47}{2,9}\right)^2} + 14,21 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-15,57}{2,6}\right)^2} + 24,68 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-9,73}{6,0}\right)^2} [c];$$

$$T_{2\gamma_{CO_2}}^H(\tau) = T_v^H + T_{\gamma_{CO_2}}^{v_c} = 7,05 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-3,47}{2,9}\right)^2} + 6,61 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-15,57}{2,6}\right)^2} + 11,48 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-9,73}{6,0}\right)^2} + 2,15 [c].$$

τ – time from the start of blowing, min.

To implement the model-predictive controller leading, manufacturer-independent PLC automation software CODESYS V3.5 [7] was chosen, which complies with the requirements of the IEC 61131-3 standard. A functional block of the predictive model for the MPC was developed (see Figure 1). The code for the respective functional block is available at the following link:

<https://drive.google.com/drive/folders/1jJHXEQJXw38ifcWAnHMWl8oY1IzmcBM?usp=sharing>.

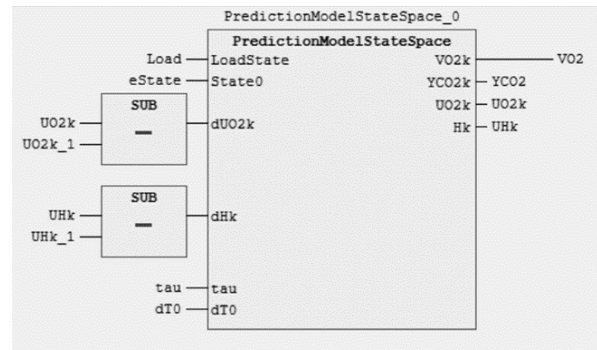


Figure 1. Functional block of the predictive model

The mathematical model for prediction uses the current state of the system as initial conditions. Since measuring the current state of the system is not possible, it is necessary to develop a state observer. For the considered system the Kalman criterion [8] is satisfied regarding observability and controllability, as the rank of the respective matrices equals the number of states of the system, allowing the development of a state observer and a controller. The structural diagram of the state observer for the system is provided in Figure 2, and a Luenberger observer was utilized as the observer.

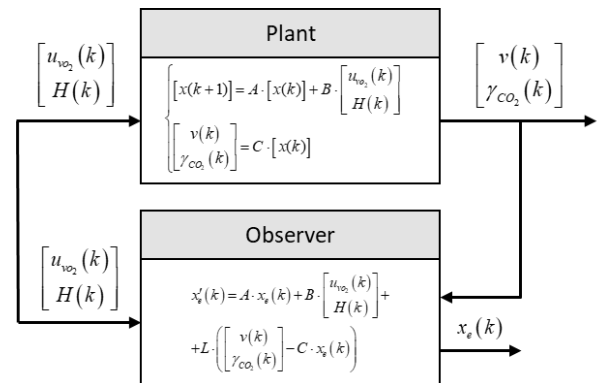


Figure 2. Structural diagram of the state observer for the system

The advantage of using the Luenberger observer is the availability of an additional state correction loop in case of discrepancies between the model and the actual behavior of the system [9]. The mathematical model of the Luenberger observer (6) is presented in the form of the equation:

$$x'_e(k) = A \cdot x_e(k) + B \cdot \begin{bmatrix} u_{w_2}(k) \\ H(k) \end{bmatrix} + L \cdot \begin{bmatrix} v(k) \\ \gamma_{CO_2}(k) \end{bmatrix} - C \cdot x_e(k), \quad (6)$$

where $L = \begin{bmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \\ 0 & l_3 \\ 0 & l_4 \\ 0 & l_5 \\ 0 & l_6 \end{bmatrix}$ is the discretized matrix of the

observer compensator. The design of the observer compensator depends on the desired characteristic equation: $(s - \beta_1) \cdot (s - \beta_2) \cdot \dots \cdot (s - \beta_n) = 0$. The observer poles must ensure rapid convergence

$\left(\begin{bmatrix} v(k) \\ \gamma_{CO_2}(k) \end{bmatrix} - C \cdot x_e(k) \right)$ of the observation error to 0.

This means that the observer's estimation error should decrease 2-5 times faster than the state of the actual system [9]. Let's consider model (6) and find l_1 the observer compensator. Taking into account the dynamic properties of the system for observer synthesis, the eigenvalues of the matrix are $\beta_1 = -2.5$. To find l_1 the Ackermann formula [10] was used $l_1 = 0.023$. Similarly, for $\beta_{2-4} = -0.75$ and $\beta_{5,6} = -1$ were gotten $l_2 = 0.01; l_3 = -0.0019; l_4 = 0.0001; l_5 = 0.0081; l_6 = -0.0017$. A functional block of the Luenberger state observer (see Figure 3) was programmed. The code for the respective functional block is available at the following link:

https://drive.google.com/drive/folders/1jJHXEQJXw38ifcWAnHMWl8oY1_lzmcBM?usp=sharing.

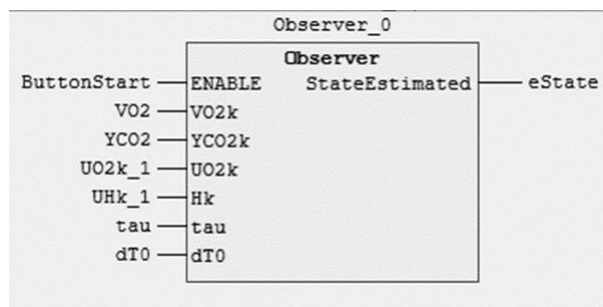


Figure 3. Functional block of the observer

The next crucial element of the MPC is the cost function. To characterize the control quality the quadratic functional (7) was used:

$$J_k(\bar{y}, \Delta \bar{u}) = \sum_{j=1}^P \left[(y_{k+j} - r_{k+j})^T R (y_{k+j} - r_{k+j}) + \Delta u_{k+j-1}^T Q \Delta u_{k+j-1} \right], \quad (7)$$

where R and Q are positive definite symmetric matrices; P is the prediction horizon length. The prediction horizon based and the coefficients of matrices R and Q

depend on the dynamics of the process and chosen according to the desired quality of the transient process of the control system:

$$R = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.03 \end{bmatrix}; P = 35.$$

A functional block for the cost function was developed. The code for the respective functional block is available at the following link:

https://drive.google.com/drive/folders/1jJHXEQJXw38ifcWAnHMWl8oY1_lzmcBM?usp=sharing.

The chosen quadratic functional is a convex function, thus leading to a convex programming problem. The quadratic functional is algorithmically defined, so zeroth-order methods were applied. These are used when, for some reason, calculating the gradient of the objective function is impossible, and also in cases where the function is algorithmically defined. This includes scenarios where conducting a natural or numerical experiment is required to compute the function values for certain argument values. The Hooke-Jeeves method [11] was chosen as an optimization method. It demonstrates an optimal balance between the number of steps and function evaluations when solving the optimization problem, compared to the simplex method and the steepest descent method. The search according to this method consists of a sequence of search steps to explore the function around the base point, from which, in case of success, a search is made in the pattern. A functional block for the Hooke-Jeeves optimization method (see Figure 4) was created. The code for the respective functional block is available at the following link:

https://drive.google.com/drive/folders/1jJHXEQJXw38ifcWAnHMWl8oY1_lzmcBM?usp=sharing.

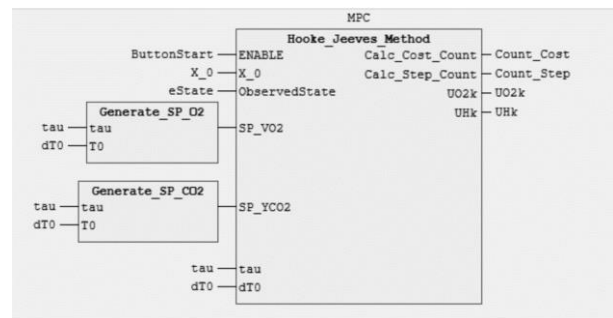


Figure 4. Functional block of the optimization solver

The simulation procedure for the MPC with oxygen converter blowing parameters was performed using Matlab Simulink (process model) and SoftPLC CODESYS V3.5 (MPC). In Matlab Simulink the Euler algorithm with a fixed step size of 0.1s was chosen for solving equations. The absolute and relative calculation accuracy was set to 0.001. In the CODESYS V3.5 programming environment, the execution type of the main task was set as cyclic with a step of 0.1s, which is sufficient for the real process. Communication between Matlab Simulink and CODESYS V3.5 is carried out using the OPC UA protocol. We will perform modeling of the transient characteristics of the automatic control system for the oxygen converter blowing mode using the model-predictive approach. Let's consider the

transient characteristic of the control system for the oxygen converter blowing intensity with a predetermined setpoint change (see Figure 5).

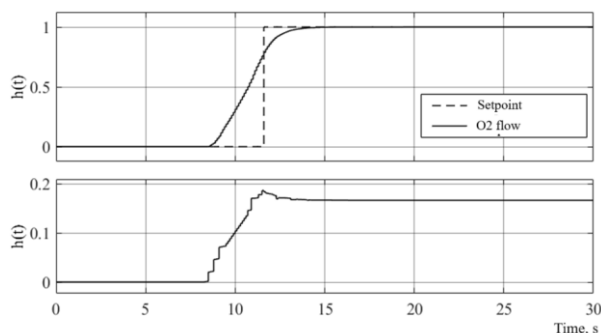


Figure 5. Transient response of the oxygen blowing

For the system regulating the CO₂ content during the oxygen converter process, the task of program control and stabilization is considered in the presence of disturbances: changes in oxygen flow rate for blowing, variation in decarburization speed, introduction of bulk materials, etc. The transient response of the CO₂ content control system with a predetermined setpoint change is shown in Figure 6.

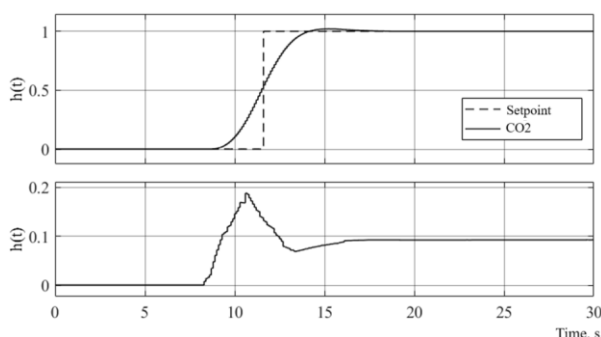


Figure 6. Transient response of the CO₂ content

The transient processes of the blowing mode were simulated for a duration of 20 minutes for a 160-ton converter with model predictive control and a combined control system with PID control for the CO₂ content in the flue gases and oxygen flow rate for the program control task. The obtained transient processes of the automatic control system for the oxygen converter smelting mode using the combined control system provided an Integrated Squared Error (ISE) for the oxygen flow rate loop of 9075 and for the CO₂ content in the converter gases loop of 1397. The maximum dynamic deviation of the CO₂ content in the converter gases was 17.5%. Using the model predictive controller achieved an ISE for the oxygen flow rate loop of 5577 and for the CO₂ content in the converter gases loop of 43. The maximum dynamic deviation of the CO₂ content in the converter gases was 0.95%.

IV. CONCLUSIONS

An automatic control system for the oxygen converter blowing mode parameters was developed and analyzed. A Luenberger state observer for the oxygen

converter smelting mode was synthesized. Taking into account the dynamic properties of the system, the observer compensator was calculated for the desired characteristic equation using the Ackermann formula. The observability and controllability of the oxygen converter smelting mode model were investigated according to the Kalman criterion. A state observer and a controller were designed to minimize the linear-quadratic functional. Since the quadratic functional was algorithmically defined, a zeroth-order optimization method, the Hooke-Jeeves method, was applied. The application of the model predictive controller improved the regulation quality for the oxygen flow rate loop by 39% (reducing the quadratic deviation from 9075 to 5577) and for the CO₂ content control loop in the converter gases by 97% (reducing the quadratic deviation from 1397 to 43). The maximum dynamic deviation of the CO₂ content in the converter gases was reduced by 16.55% (from 17.5% to 0.95%) compared to the combined control system with PID control.

REFERENCES

- [1] O. Stepanets, and Y. Mariash. Model predictive control application in the energy saving technology of basic oxygen furnace. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2020. Vol. 10(2). Pp. 70–74. URL: <https://doi.org/10.35784/iapgos.931>.
- [2] D. F. Chernega. Fundamentals of metallurgical production of metals and alloys. Kyiv : Higher School, 2006.
- [3] B. Nenchev, C. Panwisawas, X. Yang, J. Fu et al. Metallurgical Data Science for Steel Industry: A Case Study on Basic Oxygen Furnace. *Steel research international*. 2022. Vol. 93. Pp. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1002/rin.202100813>.
- [4] J. Zhang. Optimal Control Problem of Converter Steelmaking Production Process Based on Operation Optimization Method. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015. Vol. 2015. Pp. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/483674>.
- [5] O. V. Stepanets and Y. I. Mariash. Model predictive control toolbox design for nonstationary process. *KPI Science News*. 2021. Vol. 1. Pp. 42–49. URL: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.1.217992>.
- [6] N. Petrosky-Nadeau, and L. Zhang. Solving the Diamond-Mortensen-Pissarides model accurately. *Quantitative Economics*. 2017. Vol. 8(2). Pp. 611–650. URL: <https://doi.org/10.3982/qe452>.
- [7] Why codesys? The right choice for users and device manufacturers across all industries. [Online]. URL: <https://www.codesys.com/the-system/why-codesys.html>. (Accessed: October 13, 2023).
- [8] R.-Y. Cai, H.-C. Zhou, and C.-H. Kou. Kalman rank criterion for the controllability of fractional impulse controlled systems. *IET Control Theory & Applications*. 2020. Vol. 14(10). Pp. 1358–1364. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2019.0027>.
- [9] K. E. Vinodh, J. Jovitha, and S. Ayyappan. Comparison of four state observer design algorithms for MIMO system. *Archives of Control Sciences*. 2013. Vol. 23(2). Pp. 243–256. URL: <https://doi.org/10.2478/acsc-2013-0015>.
- [10] M. Costandin, P. Dobra, B. Gavrea. A new proof of Ackermann's formula from control theory. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Matematica*. 2017. Vol. 62(3). Pp. 325–329. URL: <https://doi.org/10.24193/subbmath.2017.3.05>.
- [11] I. Moser. Hooke-Jeeves revisited. *2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Trondheim, Norway, 18–21 May 2009, 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/cec.2009.4983277>.

Method of automatic fault location in 6-35 kV electrical networks

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.079>

Oleksandr Shepel

Department of Automation of Production Processes
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
iam.alex.shepel@gmail.com

Anatolii Matsui

Department of Automation of Production Processes
Central Ukrainian National Technical University
Kropyvnytskyi, Ukraine
matsuyan@ukr.net

Abstract— The paper analyses the known means of fault location in electrical networks, identifies their disadvantages and proposes its own method of solving this problem. The model of electric network is built and investigated by MATLAB.

Keywords — power grids; single-phase ground fault; fault location; modelling.

I. INTRODUCTION

The electric power system, as a control object, combines numerous elements of different levels of complexity: power plants, power transmission lines, substations, transformers, automation and relay protection devices, etc. All elements of the system are interconnected by complex links [1]. All elements of the system are interconnected by complex links [1]. At the same time, the system acquires difficulties related to optimisation of its operation modes, sensitivity to damages, complexity of repair works, etc.

Faults in the power grid are random and unpredictable. Therefore, they lead to disruption of power supply regimes and under-delivery of electricity to end consumers. The losses of the power supply company depend on how quickly the damaged section of the network is repaired.

The time during which a damaged network section is de-energised is determined by the duration of fault location and the duration of repair. For this reason, it is important to optimise the fault location process.

II. ANALYSIS OF LATEST RESEARCHES AND PUBLICATIONS

Devices for fault location began to appear in power systems in the early 1960s. Prior to that, fault location was determined by bypassing, bypassing, and sometimes by helicopter overflight of the line route. This work requires a lot of time and money, as the lines are up to hundreds of kilometres long, and the line route often runs through difficult terrain. In addition, the fault location is sometimes poorly visible even in close proximity. It is even more difficult to determine the fault location in the case of a self-recovering fault, where the line remains in operation after automatic reclosing. The information about such damages is useful for repair services, because usually after them there is a weakened place on overhead lines, which can lead to an accident in the future. All this has led to the widespread use of fault location methods and tools [2]. However, they are usually limited to short-circuit location. At present, most

substations of 110 kV and above are equipped with fault location devices. In PJSC "Kirovogradoblenergo" 150 kV substations are equipped with "Rekon-07BS" devices, which record the transient process during a short circuit, and based on the analysis of emergency parameters with an accuracy of 50-150 m via telemechanics channel indicate to the on-duty dispatcher the place of damage. The data are given from my own experience in a power distribution company. It was not possible to find any documented data with an assessment of the accuracy of fault location.

6-35 kV networks have an isolated neutral operating mode. If we consider this mode of neutral operation from the point of view of fault location, it should be noted that there is no dependence of the single-phase earth fault current on the distance to the fault location. And since this principle is the basis for the operation of fault location devices, an automated method of detection of single-phase earth faults has not been developed at present [3]. Substation duty personnel can only obtain information about the number of the feeder on which the single-phase earth fault occurred. This process can occur in two ways:

- 1) with the help of the "Altra-32" device, which automatically detects the damaged branch line by analysing the zero sequence currents of each feeder and the zero sequence voltage at the substation busbars;

- 2) by alternately disconnecting each connection and observing the zero sequence voltage. This paper is devoted to the development of methods for fault location in single-phase earth faults in networks with isolated neutral, as the least developed area of fault location.

III. FORMULATION OF RESEARCH OBJECTIVES

The purpose of this publication is to develop an automatic method of fault location in 6-35 kV insulated-neutral power grids with single-phase earth fault.

IV. STATEMENT OF THE MAIN MATERIAL

The authors of the publication propose a frequency method for determining the location of a single-phase earth fault in a network with isolated neutral, which is based on analysing the harmonic composition of the transient current during a single-phase earth fault. Namely on the observation of the change of the resonant frequency of the network during a single-phase earth fault.

For this purpose, a 35 kV network model was built and studied in MATLAB Simulink environment (Fig.1). It consists of a block of step-down transformer "TDTN-63000/150/35/10" on the supply side of the lines; a block of lines (U-shaped substitution diagram) "Pi Section Line"; a block of step-down transformer "TRDNS-25000/35/10" on the receiving side of the line under study; an equivalent line "Equivalent Line", which takes into account the influence of lines that are on the

same busbars with the line under study; Equivalent Load", by means of which the influence of transformers and loads of the 35 kV network connected to the busbars of the substation under study is taken into account; "Impedance Measurement" block, by means of which the change of impedance of the part of the network shown in the figure is studied depending on the distance to the fault location, and therefore the change of its own resonant frequency.

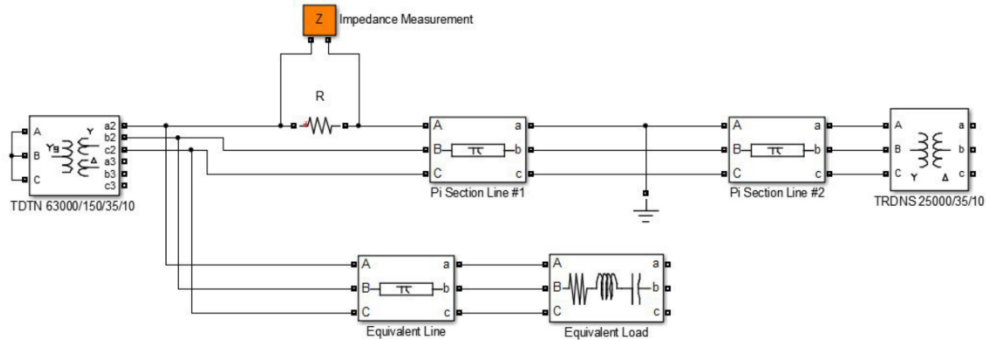


Figure 1. Model of part of 35 kV network in MATLAB Simulink environment, single-phase earth fault on phase A

The conducted studies have shown that the resonance frequency depends on the distance from the supply substation to the fault location (Fig. 2). In the

figure, the resonance frequencies are indicated by local minima of the function $z = F(f)$, where z is the input impedance of the network, f is the frequency.

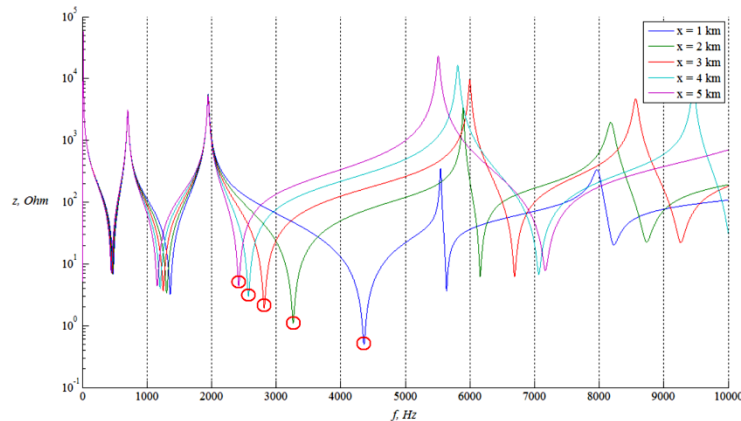


Figure 2. Displacement of the mains resonant frequency (highlighted with red markers) at different distance x to the single-phase earth fault location

V. CONCLUSIONS AND PROSPECTS FOR FURTHER RESEARCH

The conducted research has shown the existence of a promising way to solve the problem of automating the process of fault location in 6-35 kV networks.

The direction of further research is to determine the function $f=F(L)$ of the change of resonant frequency f from the distance to the place of single-phase earth fault L . This will make it possible, having fixed the frequency of higher harmonics during transients from the device

developed in the future and automatically determine the distance to the fault location.

REFERENCES

- [1] V. V. Shevchenko. Fundamentals of electric power engineering. Kharkiv : FOP Panov A.M., 2019.
- [2] V. M. Kutin, and V. V. Lutsiak. Methods and means of fault location in distribution networks with overhead power lines of 6-35 kV. Vinnytsia : VNTU, 2011.
- [3] V. M. Kutin, and P. K. Pisklyarov. Search of damages in distribution electrical networks. Kiev : Tehnika, 1994.

Степеневе підсилення локальних контрастів зображення

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.080>

Роман Воробель

Відділ теорії хвильових процесів та оптичних методів діагностики
ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України
м. Львів, Україна
Department of Computer Science
University of Lodz
Lodz, Poland
roman.vorobel@gmail.com

Олена Берегуляк

Відділ теорії хвильових процесів та оптичних методів діагностики
ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України
м. Львів, Україна
olena.berehulyak@gmail.com

Ірина Івасенко

Відділ теорії хвильових процесів та оптичних методів діагностики
ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України
м. Львів, Україна
Кафедра програмного забезпечення
НУ «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
ivasenko.iryana@gmail.com

Теодор Мандзій

Відділ теорії хвильових процесів та оптичних методів діагностики
ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України
м. Львів, Україна
teodor.mandziy@gmail.com

Анотація—Проведено аналіз моделей сприйняття світла людиною, які слугують основою побудови методів покращання якості зображень через підсилення їх локальних контрастів. Показано, що вираз для визначення локального контрасту є базою для побудови алгоритму покращання якості зображення. Виокремлено три види локального контрасту, зокрема абсолютний, відносний і зважений та проілюстровано технологію побудови методу підсилення якості зображення з їх використанням. Описано новий метод покращання якості зображення, який базується на степеневій залежності реакції зорової системи людини на світлове збудження та проведено експериментальне дослідження його ефективності.

Ключові слова—оброблення зображень, локальний контраст, степеневе підсилення, зорове сприйняття світла.

I. ВСТУП

Широке застосування роботизованих мобільних систем для промисловості, медицини, геології та побуту вимагає розроблення ефективних засобів підвищення якості зображень практично у реальному часі їх реєстрації. При цьому базовою складовою покращання якості зображень виступає підсилення їх локальних контрастів у просторовій області. Саме обробка зображень у просторовій області характеризується відносною простотою та швидкодією. Однак відомі методи підсилення локальних контрастів, які базуються на використанні абсолютного, відносного чи зваженого контрастів [1–2], не забезпечують рівномірності цього підсилення у широкому динамічному

діапазоні інтенсивностей зображень. Тому актуальним є розроблення методу підсилення локальних контрастів, який використовує степеневу модель сприйняття зображення, як засобу зорового збудження у широкому діапазоні його інтенсивностей.

II. ОСНОВНІ МОДЕЛІ СПРИЙНЯТТЯ СВІТЛОТИ ЛЮДИНОЮ

Реакція зорової системи на зміну інтенсивностей у широкому їх діапазоні є базовою складовою кількісного визначення зміни спостережуваних інтенсивностей. Основною залежністю тут [3] виступає логарифмічно-лінійна. Вона задовільно передбачає психофізичну реакцію людини на світлове збудження та описується виразом

$$I_{out}(x, y) = K_1 \ln [K_2 + K_3 I_{in}(x, y)], \quad (1)$$

де K_1, K_2, K_3 – це константи, а $I_{in}(x, y)$ та $I_{out}(x, y)$ – вхідний та вихідний сигнал відповідно. Відомі також і інші моделі [4], які описують реакцію виразом

$$I_{out}(x, y) = \frac{K_1 I_{in}(x, y)}{K_2 + I_{in}(x, y)}, \quad (2)$$

де K_1, K_2 – це сталі. У роботі [5] Маннос та Сакрісон вивчали різні нелінійності, які використовують в аналітичних мірах вірності відтворення зображень. Вони встановили, що степенева нелінійність

$$I_{out}(x, y) = [I_{in}(x, y)]^R, \quad (3)$$

де R – стала, забезпечує добре узгодження між обчисленою вірністю та суб'єктивною оцінкою якості зображення. В роботі [3] описані базові моменти сприйняття світла людиною. Зокрема, розглядається джерело білого світла L_1 , яке має яскравість Y і розташоване безпосередньо близько до другого джерела білого світла L_2 з тим самим спектром випромінювання та яскравістю $Y + \Delta Y$. Вимірювання контрастної чутливості показали [3], що відношення Вебера $\Delta Y/Y$, тобто відношення ледь помітної (порогової) різниці яскравостей до абсолютного значення яскравості Y , у достатньо широкому діапазоні значень Y , майже постійне і рівне 1-2%. На цій підставі можна стверджувати, що приріст світлоти другого джерела стосовно першого має визначатися логарифмічним виразом

$$\Delta\{L_1, L_2\} = \log_b(Y + \Delta Y) - \log_b(Y), \quad (4)$$

а не різницею яскравостей ΔY . Оскільки диференціал логарифма яскравостей рівний

$$d[\log_b(Y)] = \lim_{\Delta Y \rightarrow 0} [\log_b(Y + \Delta Y) - \log_b(Y)] = \log_b(e) \frac{dY}{Y}, \quad (5)$$

то приріст логарифма яскравості рівний відношенню Вебера (e – стала Ейлера). Маннос і Сакрісон [5] вивчали можливості зміни вірності відтворення одноколірних зображень за допомогою виразу (3). В цьому випадку мірою приросту світлоти стає величина

$$\Delta\{L_1, L_2\} = (Y + \Delta Y)^\nu - (Y)^\nu, \quad (6)$$

де ν – постійна. У роботі Корнвіта [5] було зроблено припущення про те, що відгук фоторецепторів сітківки ока описувався нелінійним законом (3). Тоді відповідна міра приросту світлоти обчислюється як

$$\Delta\{L_1, L_2\} = \frac{K_1(Y + \Delta Y)}{K_2 + (Y + \Delta Y)} - \frac{K_1 Y}{K_2 + Y}, \quad (7)$$

де K_1, K_2 – сталі.

Міри (4), (6) і (7) належать до локальних мір зміни світлоти. Часто використовують і глобальні міри, які служать для порівняння яскравостей сильно відмінних джерел світла. Такі міри були отримані на основі емпіричних моделей, побудованих на експериментальному матеріалі. Зокрема Пріст, Гібсон та Макніколс [6] запропонували просте співвідношення

$$\Lambda = Y^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

де яскравість змінюється у відсотках $0 \leq Y \leq 100$, а світлота змінюється від 0 до 10. Лед і Пінні [7] використовували шкалу з кубічним коренем

$$\Lambda = 2,468 \cdot Y^{\frac{1}{3}} - 1,636, \quad (9)$$

де яскравість також змінюється у відсотках. В доповнення до цих залежностей Фосс [8] ввів логарифмічну шкалу

$$\Lambda = \lg Y + 0,25. \quad (10)$$

Джад [9] ввів шкалу світлоти, яка враховувала фонове освітлення Y_B . В цьому випадку світлота визначалася виразом

$$\Lambda = \frac{0,1 \cdot Y(Y_B + 100)}{Y_B + Y}. \quad (11)$$

Водночас зазначимо, що емпірична шкала Джадда за своєю формою аналогічна співвідношенню (7), яке описує нелінійну модель відгуку фоторецепторів. Враховуючи описані вище моделі сприйняття світлоти людиною розглянемо степеневу модель. При цьому виходитимемо з того, що це буде двокомпонентна модель, яка за базові складові використовує низькочастотну та високочастотну складові. Тому на початку покажемо як аналітичний вираз локального контрасту слугує побудові методу покращання якості зображення.

III. ВИБРАНІ МЕТОДИ ПОКРАЩАННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ПІДСИЛЕННЯМ ЇХ ЛОКАЛЬНИХ КОНТРАСТІВ

Для ілюстрації методу покращання зображення підсиленням його локальних контрастів виберемо три їх види – абсолютний відносний та зважений.

A. Метод на основі абсолютного локального контрасту

Цей вид контрасту C_1 описується різницею інтенсивності елемента зображення L та усередненого значення \bar{L} околу W його елементів

$$\bar{L} = \text{mean}(L)_{L \in W} \quad (12)$$

як

$$C_1 = L - \bar{L}, \quad (13)$$

звідки

$$L = \bar{L} + C_1. \quad (14)$$

Тоді, підсилюючи локальний контраст C_1 так, що його нове значення C_1^* відповідає вимозі

$$|C_1^*| > |C_1|, \quad (15)$$

формуємо нове значення L^* інтенсивності L

$$L^* = \bar{L} + C_1^*. \quad (16)$$

Отриманий вираз (16) засвідчує, що абсолютний локальний контраст (13) є основою синтезу методу

нерізкого маскуванню, який полягає у формуванні нової інтенсивності елемента зображення L^* як суми низькочастотної складової \bar{L} (12) та підсиленої високочастотної складової C_1^* .

В. Метод на основі відносного локального контрасту

Цей вид контрасту C_2 описується виразом

$$C_2 = \frac{L - \bar{L}}{L}, \quad (17)$$

для $L \geq \bar{L}$, звідки

$$L = \frac{\bar{L}}{1 - C_2}. \quad (18)$$

Підсилюючи локальний контраст C_2 так, що його нове значення C_2^* відповідатиме вимозі

$$|C_2^*| > |C_1|, \quad (19)$$

формуємо нове значення L^* інтенсивності L , яке описується виразом

$$L^* = \frac{\bar{L}}{1 - C_2^*}, \quad (20)$$

а для випадку $\bar{L} > L$ – виразом

$$L^* = \bar{L}(1 - C_2^*). \quad (21)$$

Об'єднуючи вирази (18) і (21) маємо

$$L^* = \bar{L} \cdot (1 - C_2^*)^{\text{sign}(\bar{L} - L)}. \quad (22)$$

Отриманий вираз (22) репрезентує метод підсилення відносного локального контрасту [1,2].

С. Метод на основі зваженого локального контрасту

Цей вид контрасту C_3 описується виразом

$$C_3 = \frac{L - \bar{L}}{L + \bar{L}}, \quad (23)$$

для $L \geq \bar{L}$, звідки

$$L = \bar{L} \frac{1 + C_3}{1 - C_3}. \quad (24)$$

Застосовуючи описане вище підсилення локального контрасту C_3 формуємо нове його значення

$$|C_3^*| > |C_3| \quad (25)$$

і, відповідно, нове значення L^* інтенсивності L (24), яке набуває виду

$$L^* = \bar{L} \frac{1 + C_3^*}{1 - C_3^*}, \quad (26)$$

а для випадку $\bar{L} > L$

$$L^* = \bar{L} \frac{1 - C_3^*}{1 + C_3^*}. \quad (27)$$

Об'єднуючи вирази (26) і (27) отримуємо

$$L^* = \bar{L} \left(\frac{1 + C_3^*}{1 - C_3^*} \right)^{\text{sign}(\bar{L} - L)}. \quad (28)$$

Вираз (28) репрезентує метод підсилення зваженого локального контрасту. Однак описані вище методи підсилення локального контрасту не забезпечують рівномірності його підсилення як для висококонтрастних областей зображення, так і для слабоконтрастних ділянок. Для усунення цього недоліку нами побудований інший метод, який базується на степеневому формуванні реакції зорової системи людини. Опишемо його далі.

IV. НОВИЙ МЕТОД СТЕПЕНЕВОГО ПІДСИЛЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ КОНТРАСТІВ ЗОБРАЖЕННЯ

У розробленому нами методі локальний контраст описується виразом

$$C_4 = \frac{\ln L - \ln \bar{L}}{\ln L} \quad (29)$$

для випадку $L > \bar{L}$. Цей метод також використовує підсилення локального контрасту, яке описується виразом

$$|C_4^*| > |C_4|. \quad (30)$$

З виразу (29) визначаємо величину L і отримуємо, що вона описується виразом

$$L = \exp \left[\frac{\ln \bar{L}}{(1 - C_4^*)} \right], \quad (31)$$

а для випадку підсиленого локального контрасту з величини C_4 до C_4^* отримуємо відповідно нове значення L як L^* :

$$L^* = \exp \left[\frac{\ln \bar{L}}{(1 - C_4^*)} \right] = \bar{L}^{\frac{1}{(1 - C_4^*)}}. \quad (32)$$

Для випадку $\bar{L} > L$ вираз для локального контрасту є таким

$$C_4 = \frac{\ln \bar{L} - \ln L}{\ln \bar{L}}, \quad (33)$$

звідки

$$L = \exp\left[(1 - C_4) \cdot \ln \bar{L}\right] \quad (34)$$

Враховуючи підсилення локального контрасту (33) з C_4 до C_4^* маємо

$$L^* = \exp\left[(1 - C_4^*) \cdot \ln \bar{L}\right] \quad (35)$$

або

$$L^* = \bar{L}^{(1 - C_4^*)} \quad (36)$$

Отримані вирази (32) та (36) можемо об'єднати в один

$$L^* = \bar{L}^{(1 - C_4^*) \cdot \text{sign}(\bar{L} - L)} \quad (37)$$

Отриманий вираз (37) демонструє саме степеневу залежність впливу локального контрасту на загальну процедуру покращання якості зображення.

V. ВИСНОВКИ

Експериментальні результати застосування розробленого методу покращання якості зображення

через підсилення локальних контрастів підтвердили його ефективність. Це досягнуто завдяки вирівнюванню ступеня підсилення локальних контрастів, зумовленого використанням логарифмічної шкали при поданні складових локального контрасту.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Яворський І. М., Почапський Є. П., Воробель Р. А., Русин Б. П. Інформаційні технології неруйнівного контролю. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій : довідн. пос. у 8-ми томах. Львів : Простір-М, 2018. 508 с.
- [2] Воробель Р. А. Логарифмічна обробка зображень. Київ : Наукова думка, 2012. 231 с.
- [3] W. K. Pratt. Digital Image Processing. New Jersey : Wiley, 2007.
- [4] T. N. Cornsweet. Visual Perception. New York : Academic Press, 1970.
- [5] J. L. Mannos, and D. J. Sakrison. The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images. *IEEE Trans. on Inf. Theory*. 1974. Vol. IT-20(4). Pp. 525–536.
- [6] I. G. Priest, K. S. Gibson, and H. J. McNicholas. An examination of the Munsell color system. I. Spectral and total reflection on the Munsell scale of value. *U.S. National Bureau Standards. Technical paper*. 1920. Vol. 167.
- [7] J. H. Ladd, and J. E. Pinney. Empirical Relationships with the Muncell value scale. *Proc. IRE (Correspondence)*. 1955. Vol. 43(9). Pp. 1137.
- [8] C. E. Foss, D. Nickerson, and W. C. Granville. Analysis of the Ostwald color system. *J. Opt. Soc. Am.* 1944. Vol. 34(7). Pp. 361–381.
- [9] D. B. Judd. Hue, saturation and lightness of surface colors with chromatic illumination. *J. Opt. Soc. Am.* 1940. Vol. 30(1). Pp. 2–32.

Побудова локальної карти прохідності навчальним роботом з ультразвуковим сенсором HC-SR04

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.081>

Олександр Гаврилюк

Група АКІТм-61

Національний університет водного господарства та природокористування

м. Рівне, Україна

havryliuk_ak18@nuwm.edu.ua

Дмитро Реут

Кафедра автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій

Національний університет водного господарства та природокористування

м. Рівне, Україна

d.t.reut@nuwm.edu.ua

Ірина Аврука

Кафедра автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій

Національний університет водного господарства та природокористування

м. Рівне, Україна

a.s.avruka@nuwm.edu.ua

Анотація—Розроблено систему вимірювання відстаней й побудови локальної карти прохідності за допомогою ультразвукового датчика HC-SR04 навчального робота в середовищі Robot Operating System. Досліджено особливості сканування простору ультразвуковим датчиком, що спричиняють неточності локальної карти прохідності.

Ключові слова—робот; ультразвуковий давач відстані; Robot Operating System; Rviz; Rosserial.

I. ВСТУП

Одним з необхідних етапів при вирішенні задачі одночасної локалізації і картографування (SLAM) роботом [1] у приміщенні є побудова локальної карти прохідності. Вона містить дані з сенсорів робота на поточний момент і використовується при побудові глобальної карти прохідності всього приміщення, яка в свою чергу використовується для визначення роботом свого поточного положення в приміщенні (локалізації). Сенсорами робота можуть бути лідари, радари, ультразвукові датчики, моно- і стереокамери, камери глибини тощо.

Метою роботи є розробка системи, яка дозволить побудувати карту прохідності приміщення, доступного роботу, використовуючи недорогий і поширений ультразвуковий датчик HC-SR04.

II. БУДОВА СИСТЕМИ

В ролі сенсора розробленої системи (рис. 1) використовується ультразвуковий датчик HC-SR04, що приводиться в рух сервоприводом MG90, закріпленим на роботі Keystudio KS0526 [2]. Контролером робота є плата Arduino Uno, а зв'язок із іншими пристроями забезпечується Bluetooth-модулем HM-10. Верхній рівень системи

реалізовано на базі Robot Operating System (ROS). Використання в Arduino послідовного інтерфейсу для передачі даних через Bluetooth потребує наявності на верхньому рівні програми, що зчитує дані з послідовного інтерфейсу в середовище ROS. Такою є RosSerial, доступна в ROS Noetic Ninjemys (підтримує Ubuntu 20.04), тому використана саме дана версія ROS, а не найновіша ROS2.

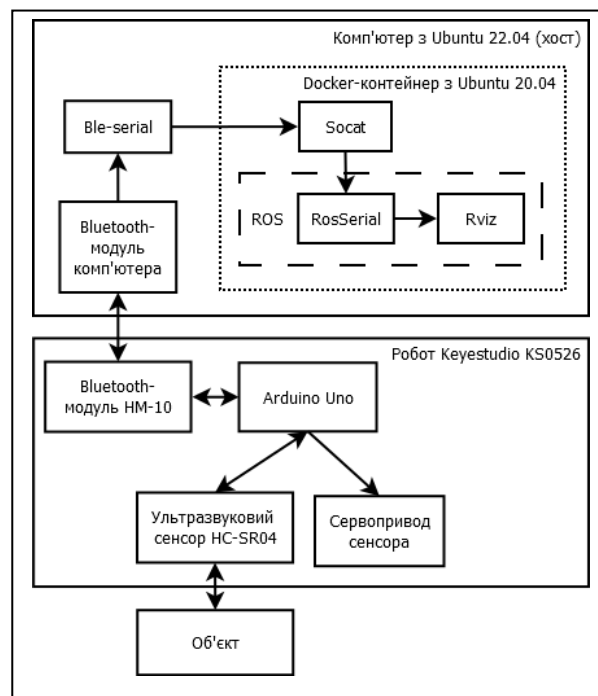


Рисунок 1. Структурна схема розробленої системи

Датчик HC-SR04 приводиться в рух сервоприводом, який під керуванням плати Arduino Uno змінює своє положення з кроком 10 градусів.

Плата Arduino Uno надсилає сигнал активації генератора ультразвуку, очікує від датчика сигнал про прихід відбитої від перешкоди ультразвукової хвилі, вимірює час і обчислює відстань. Повний хід сервопривода з одного крайнього положення в інше дозволяє отримати набір відстаней, які використовуються для формування повідомлення типу `sensor_msgs/LaserScan`, прийнятого в Robot Operating System. Повідомлення надсилається через послідовний інтерфейс у Bluetooth-модуль HM-10, який передає дані на Bluetooth-модуль ноутбука з операційною системою Ubuntu 22.04. Роботу з послідовним інтерфейсом в ROS забезпечує вузол `Rosserial` [3], що вимагає використання Ubuntu 20.04, тому остання запускається в Docker-контейнері.

Отримання даних від Bluetooth-модуля HM-10 забезпечує програма `ble-serial`, яка надає доступ до них іншим через TCP. В Docker-контейнері встановлено середовище операційної системи Robot Operating System на базі Ubuntu 20.04. Запущена в ньому програма `Socat` здійснює отримання даних через TCP й пересилає їх у віртуальний послідовний порт `/dev/ttyNET0`. Таким чином отримуємо прозорий канал послідовного інтерфейсу від Arduino Uno до програми в контейнері.

Після встановлення з'єднання та виконання першого циклу сканування дані з хоста передаються у запущений вузол `Rosserial` – програму, яка приймає дані з послідовного порта й публікує їх в середовище ROS. Фінальним кроком була передача даних із вузла `Rosserial` у програму `Rviz` [4], яка в режимі реального часу візуалізує отримані відстані до точок-перешкод, по суті відображаючи локальну карту прохідності. Застосування BLE для передачі даних між HM-10 та Bluetooth-модулем ноутбука дозволяє забезпечити бездротову комунікацію з низьким споживанням енергії.

Ультразвук, генерований датчиком, може по різному відбиватися від різних поверхонь. Гладкі, рівні поверхні зазвичай краще відбивають ультразвук, тоді як нерівні або пористі поверхні можуть поглинати або розсіювати сигнал. Це може вплинути на точність вимірювання відстані та здатність датчика виявляти перешкоди. Були побудовані локальні карти прохідності, що містять виміряні датчиком відстані з кроком 10° у секторі $[-80^\circ; 80^\circ]$ від перпендикуляра до об'єкта.

Вимірювались відстані до об'єктів прямокутної, циліндричної форм та довгої плоскої стінки. Виявлено, що при куті падіння більше 30° до поверхні датчик не отримує відбитого ультразвукового променя достатньої потужності. Це пояснюється відбиттям ультразвукового променя в іншому напрямку, відповідно він не повертається назад в приймач датчика. Це може призвести до зменшення точності вимірювання відстані та зниження здатності датчика виявляти перешкоди (рис. 2), особливо з поверхнями, які знаходяться під великими кутами до напрямку сканування.

Відповідно під час побудови карти прохідності робот повинен просканувати кожен квадрат простору з різних сторін, що мінімізує ймовірність пропуску об'єктів під час сканування.

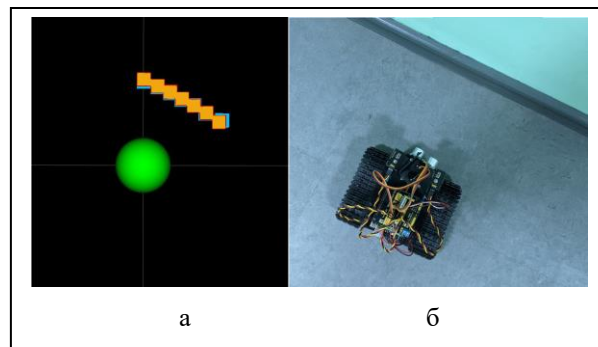


Рисунок 2. Сканування плоскої стінки: а) локальна карта прохідності; б) реальне положення перешкоди

Для зменшення впливу завад вимірювання відстані виконується 5 разів підряд у одному напрямку, значні викиди відкидаються.

Оскільки ультразвук від випромінювача поширюється не вузьконаправленим променем (як у випадку лазерного сканера), а конусом, спостерігався взаємний вплив сусідніх точок, адже крок сканування 10° менше кута при вершині конуса розльоту ультразвуку від генератора.

III. ВИСНОВКИ

Було розроблено систему вимірювання відстаней й побудови локальної карти прохідності роботом з ультразвуковим датчиком HC-SR04, платою Arduino Uno як контролером робота, Bluetooth-модулем, та ПК з Robot Operating System (зокрема програмами `Rosserial` та `Rviz`). Виявлено особливості HC-SR04, що обмежують точність побудови локальної карти прохідності. Робот може використовуватись у навчальних цілях із демонстрацією особливостей ультразвукових датчиків у навігації робота порівняно з іншими типами (наприклад, лідаром).

Можливості розробленої системи дозволяють на основі локальних карт прохідності перейти до побудови глобальної карти прохідності приміщення роботом KS0526 у ході вирішення задачі SLAM засобами Robot Operating System, що є метою майбутніх досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] U. Frese. A discussion of simultaneous and mapping. *Autonomous Robots*. 2006. Vol. 20. Pp. 25–42.
- [2] Ks0428 keyestudio Mini Tank Robot V2 - Keyestudio Wiki. [Online]. URL: https://wiki.keyestudio.com/Ks0428_keyestudio_Mini_Tank_Robot_V2. (Accessed: October 12, 2023).
- [3] “`rosserial_arduino` - ROS Wiki.” [Online]. URL: http://wiki.ros.org/rosserial_arduino. (Accessed: October 12, 2023).
- [4] “`rviz` - ROS Wiki.” [Online]. URL: <http://wiki.ros.org/rviz>. (Accessed: October 12, 2023).

Аналіз цифрової системи пов'язаного регулювання параметрів рН та Eh металовмісних стоків промислових виробництв

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.082>

Микола Клепач

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
m.i.klepach@nuwm.edu.ua

Леонід Филипчук

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
l.v.fylpchuk@nuwm.edu.ua

Марко Клепач

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
m.m.klepach@nuwm.edu.ua

Анотація—Побудовано дискретну модель автоматичної системи пов'язаного регулювання параметрів рН та Eh металовмісних стоків, синтезовано цифрові регулятори, досліджено вплив перехресних каналів та реалізовано повну автономність каналів регулювання рН та Eh за допомогою компенсаторів. Система може бути реалізована за допомогою мікропроцесорних засобів автоматизації.

Ключові слова—реагентна очистка, промислові стоки, регулювання рН та Eh, пов'язане регулювання.

I. ВСТУП

Важливим фактором впливу на процеси очищення металовмісних багатокомпонентних стічних вод промислових виробництв є регулювання активної реакції (рН) та окисно-відновного потенціалу (Eh) стоків шляхом дозування різних реагентів: кислот, лугів, окисників та відновників. Зокрема, луги використовуються для осадження важких металів, окисники – для руйнування ціанідів та органічних домішок, відновники – для знешкодження такого токсичного елемента, як шестивалентний хром. Від точності досягнення необхідних значень рН та Eh залежить підтримання потрібних швидкостей та напрямку хімічних реакцій в змішувачах-реакторах очисних установок та ступінь вилучення забруднень.

Розкриття закономірностей реагентної обробки стоків і оцінка ефективності автоматизації змішувачів-реакторів у яких протікають ці процеси не можливі без експериментальних досліджень і математичного моделювання автоматичних систем регулювання (АСР).

II. ПОБУДОВА ДИСКРЕТНОЇ МОДЕЛІ АСР

Важливим фактором у результаті проведених експериментальних досліджень [1] встановлено наявність сильних перехресних зв'язків між каналами регулювання рН та Eh в змішувачі-реакторі механічного типу та побудовано безперервну модель об'єкта регулювання при відновленні хрому лужним сульфідом натрію та з корекцією величини рН водного середовища соляною кислотою (рис. 1).

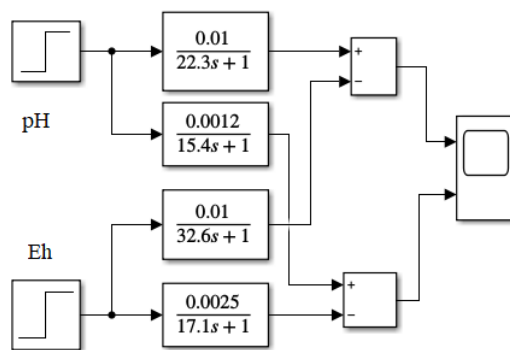


Рисунок 1. Simulink модель процесів регулювання параметрів рН та Eh хромвмісних стічних вод

Враховуючи суттєвий вплив взаємних перехресних зв'язків між каналами регулювання, було реалізовано ступінчасте введення реагентів із виділенням часу для стабілізації Eh і рН та з поступовим покроковим наближенням величини Eh до її кінцевого значення, при якому забезпечується повне окислення-відновлення забруднень [2].

Однак, сучасні мікропроцесорні засоби автоматизації дозволяють будувати автономні (незалежні) системи автоматичного регулювання в

яких нейтралізується вплив одного каналу на інший впровадженням додаткових зовнішніх перехресних зв'язків за допомогою динамічних ланок-компенсаторів. При цьому компенсуючі імпульси можуть подаватися на входи виконавчих пристроїв, якими служать насоси-дозатори реагентів з мікропроцесорним управлінням. Це спрощує реалізацію компенсаторів і не вимагає зміни їх параметрів при зміні налаштувань регуляторів. Передаточні функції компенсаторів визначені з умов автономності при коефіцієнті передачі насоса дозатора 1 мл/с·мА мають вигляд:

$$W_{K1}(s) = \frac{0.02s + 0.0012}{0.039s + 0.0025},$$

$$W_{K2}(s) = \frac{22.3s + 1}{32.6s + 1}.$$

Ці передаточні функції компенсаторів є інтегро-диференціальними ланками і можуть бути реалізовані програмно в програмованих логічних контролерах (ПЛК).

III. АНАЛІЗ АСР

Для аналізу і синтезу цифрової системи пов'язаного регулювання здійснимо перехід від аналогової до дискретної форми для цього необхідно знайти Z-зображення зведеної неперервної частини системи. Засоби пакету MATLAB дозволяють оперативно здійснити перетворення передаточних функцій з аналогової форми в дискретну. Для цього служить функція c2d, аргументами якої є передаточна функція в аналоговій формі, період дискретизації та метод екстраполяції. Цифро-аналогові перетворювачі регуляторів здійснюють екстраполяцію методом нульового порядку, який у функції c2d використовується за замовчуванням. Отже, в командній стрічці MATLAB задається аналогова передаточна функція у вигляді коефіцієнтів поліномів чисельника і знаменника:

```
>> W11=tf([0.01],[22.3 1])
```

```
W11 =
    0.01
-----
    22.3 s + 1
Continuous-time transfer function.
```

Далі, для переходу до дискретної форми виконується команда:

```
>> WD11=c2d(W11,0.1)
WD11 =
    4.474e-05
-----
    z - 0.9955
Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Період дискретизації T_0 рівний 0.1с є фіксованим і відповідає циклу виконання програми користувача для ПЛК українського підприємства Мікрол. Подібним чином визначаються інші дискретні передаточні функції системи. У результаті цифрова модель системи автономного регулювання приймає вигляд наведений на рис. 2.

Алгоритм роботи цифрового регулятора описується дискретною передаточною функцією

$$W_{PID}(z) = P + IT_0 \frac{1}{z-1} + D \frac{N}{1+NT_0 \frac{1}{z-1}}.$$

Для знаходження оптимальних параметрів регуляторів як для одноконтурних систем при розімкнутих перехресних зв'язках об'єкта використано систему Automated tuning з блоку параметрів PID-регулятора. Система оптимізації забезпечує задане перерегулювання при обмеженні на запаси стійкості системи та включає розширені функції, такі як захист від насичення інтегратора (Anti-windup), зовнішнє скидання та відстеження сигналу. Вікно інструментів та оптимізовану перехідну характеристику наведено на (рис. 3).

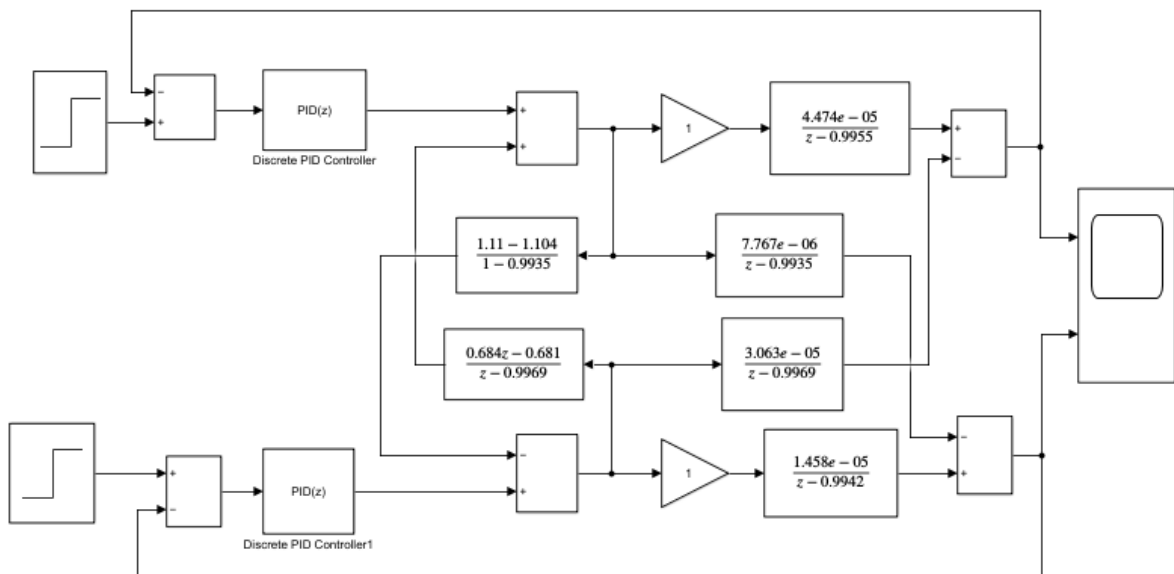


Рисунок 2. Simulink модель цифрової системи пов'язаного регулювання параметрів pH та Eh стоків

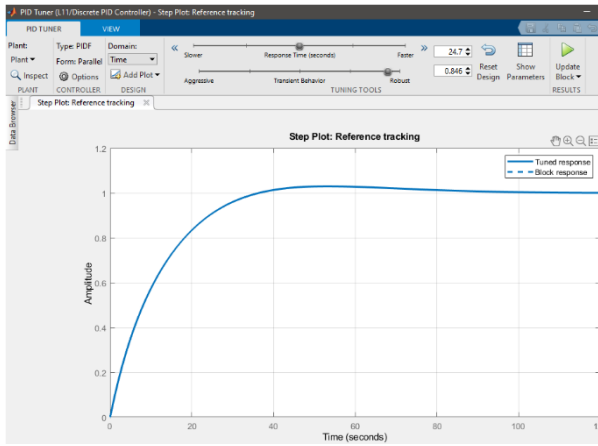


Рисунок 3. Вікно оптимізації параметрів регулятора за каналом рН

Результати оптимізації параметрів регулятора зведено в табл. I.

ТАБЛИЦЯ I. РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	164.5159	164.5159
I	10.5896	10.5896
D	216.8185	216.8185
N	0.17041	0.17041

ТАБЛИЦЯ II. ХАРАКТЕРИСТИКИ САР рН

Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	23.1 seconds	23.1 seconds
Settling time	70.3 seconds	70.3 seconds
Overshoot	2.95 %	2.95 %
Peak	1.03	1.03
Gain margin	46.9 dB @ 31.4 rad/s	46.9 dB @ 31.4 rad/s
Phase margin	84.6 deg @ 0.081 rad/s	84.6 deg @ 0.081 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

На рис. 4 показано відгук параметра рН на одиничний стрибок зміни завдання Eh при нульовому сигналі на вході системи регулювання рН.

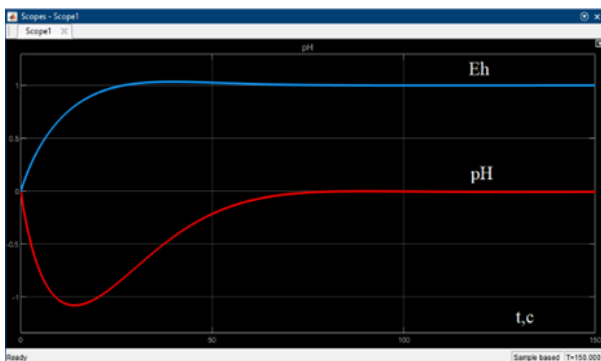


Рисунок 4. Відгук системи регулювання каналу рН на зміну Eh

Результат впровадження компенсуючого імпульсу з виходу регулятора Eh на вхід виконавчого пристрою регулювання рН (при тих же умовах) показано на рис. 5.

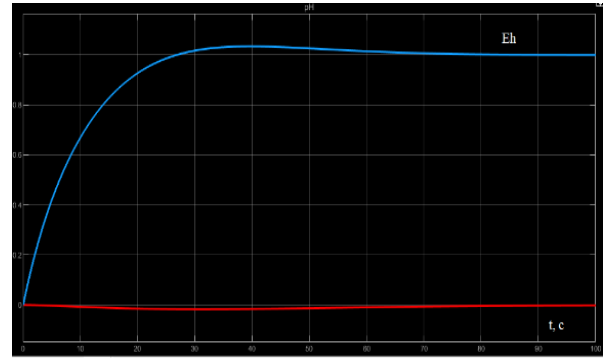


Рисунок 5 Компенсація впливу регулятора каналу Eh на канал регулювання Ph (червона лінія)

Остаточнo, перехідні характеристики цифрової автоматичної системи регулювання при забезпеченні повної автономності каналів регулювання наведено на рис. 6.

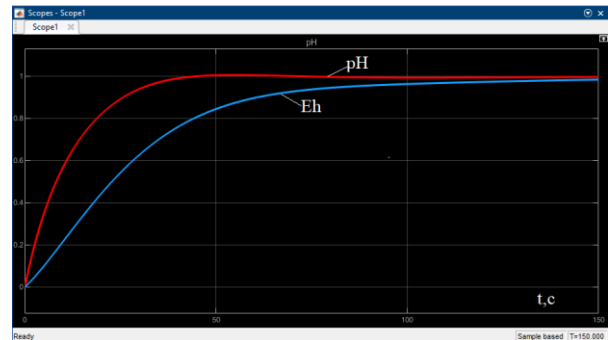


Рисунок 6. Перехідні характеристики цифрової автономної САР

IV. ВИСНОВКИ

Реалізація автономного регулювання параметрів рН і Eh водного середовища мікропроцесорними засобами автоматизації під час окислення-збуднення забруднень забезпечує мінімальну кількість введених реагентів, дозволяє контролювати хід хімічних реакцій та досягти повного окислення або відновлення забруднюючих домішок в режимі автоматизованого дозування хімічних реагентів.

Впровадження компенсаторів дозволить здійснювати одночасне разове дозування реагентів, чи скоротити число інтервалів почергового дозування. Система автоматизації може бути легко перенастроєна на видалення інших типів домішок.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Филипчук В. Л. Очищення багатокомпонентних металовміщуючих стічних вод промислових підприємств. Рівне : УДУВГП, 2004. 232 с
- [2] Филипчук В. Л., Клепач М. І., Филипчук Л. В. Спосіб автоматизації процесу регулювання величин рН та Eh багатокомпонентних стічних вод : пат. України на КМ № 65459, Бюл. № 23, 2011.

Аналіз технологічних ліній дозування лікарських препаратів як об'єкта керування

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.083>

Володимир Шалева

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, НУ «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
shaleva1997@gmail.com

Федір Матіко

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, НУ «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
fedir.d.matiko@lpnu.ua

Олег Качор

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій,
НУ «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
oleh.kachor.mavkv.2022@lpnu.ua

Анотація—В цій роботі представлено огляд та аналіз існуючих систем та методів наповнення ємностей лікарськими засобами. Визначено переваги та недоліки кожної із систем. Описано принцип роботи кожної із систем. Визначено перспективний метод наповнення ємностей який має можливості до подальшого дослідження та удосконалення для покращення його технічних характеристик.

Ключові слова—методи дозування; лікарські препарати; технологічні лінії; об'єкт керування.

I. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

У сучасних виробничих процесах існує поширена задача реалізації процесу дозування тих чи інших матеріалів, рідин, реагентів тощо. Процес дозування може бути основним для забезпечення потрібних характеристик продукції (наприклад, процес дозування рідин у ємності), а також бути частиною іншого, більш-складного технологічного процесу. У другому випадку процес дозування реалізують для підтримання проміжних параметрів у вказаних межах методом порційного дозування необхідних речовин у відповідний часовий проміжок технологічного процесу.

У фармацевтичному виробництві процес дозування відіграє важливу роль у технологіях випуску готових лікарських засобів (ГЛЗ). Процес дозування потрібно вибудувати таким чином щоб забезпечити дотримання необхідних вимог фармацевтичного виробництва, таких як GXP (правила належних практик), GMP (вимоги належної виробничої практики) [1] а також стандарту МОЗ України СТ-Н МОЗУ 42-3.4-2004 «Виробництво лікарських засобів» [2]. Відповідно до даних вимог потрібно забезпечити відповідний підбір технічних засобів реалізації процесу дозування, підбір матеріалів що матимуть контакт із ГЛЗ а також вимоги до зовнішнього середовища. Необхідно провести аналіз обраного об'єкту регулювання визначити керуючий вплив, збурюючий вплив а також вихідні параметри об'єкту.

У цій роботі авторами виконано аналіз процесу дозування ГЛЗ та систем автоматичного дозування ГЛЗ.

II. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ДОЗУВАННЯ ЛІКАРСЬКИХ ПРЕПАРАТІВ

Як відомо [3], дозування - процес відмірювання певної кількості речовини шляхом визначення її маси, об'єму або числа однакових штучних об'єктів.

За видом робочого циклу дозування може бути безперервним або порційним, а по принципу дії – об'ємним або ваговим. При безперервному дозуванні потік продукту який виходить із дозатора, безперервно зважується і в залежності від результатів зважування продуктивність дозатора постійно коректується. При фасуванні продукції, як правило, застосовується порційне дозування, яке полягає в періодичному повторенні циклів вимірювання дози продукту і подачі її на упаковування. Для порційного дозування застосовуються об'ємні і вагові дозатори, вимірювачі об'єму і маси продукції, а також дозатори однакових штучних виробів. Обладнання дозування фармацевтичної продукції включає об'ємні і вагові дозатори спеціально призначені для вимірювання кількості речовини, яка подається в окрему споживчу тару.

Авторами виконано аналіз структури, функційних можливостей систем дозування готових лікарських засобів, серед яких слід виділити три принципово відмінні системи:

- системи дозування базовані на методі шприцевого наповнення;
- системи автоматичного дозування на основі витратомірів;
- системи дозування базовані на методі вагового наповнення.

Поширеним об'ємним методом дозування є метод шприцевого наповнення. Шприцевий спосіб наповнення ампул набув широкого поширення

за кордоном і здійснюється за допомогою установок зі спеціальними дозаторами (поршневыми, мембранними та ін.). Метод має більш складне апаратне оформлення, ніж вакуумний і жорсткіші вимоги до розмірів і формі капілярів ампул, але завдяки ряду переваг він є кращим для застосування в технології ампулювання. Особливо ці переваги позначаються при проведенні операцій наповнення та запаювання в одному автоматі.

До суттєвих переваг шприцевого способу наповнення слід також віднести можливість точного дозування розчину ($\pm 2\%$) та невеликий проміжок часу наповнення та запаювання (5-10 с), що дозволяє ефективно використовувати наповнення їх вільного обсягу інертним газом та значно подовжує термін придатності препарату. При наповненні в ампулу вводиться лише необхідна кількість розчину, при цьому капіляр ампули не змочується розчином, залишається чистим, завдяки чому покращуються умови запаювання ампул. Особливо це важливо для густих та в'язких розчинів. [4].

Недоліком методу є:

- Мала продуктивність хоча вона варіюється в залежності від формату об'єкту який необхідно наповнити, тобто від об'єму тари яку наповнюємо розчином. Тож даний метод є ефективним для дозування малих об'ємів. Також окрім дозування продукції у ампули даний метод широко застосовується для дозування у флакони, хоч як і було описано вище при цьому значно втрачається продуктивність обладнання;
- Технічна та апаратна складність реалізації даного методу на обладнанні.

Перевагами даного методу є:

- Висока точність дозування $\pm 2\%$ від заданого об'єму.
- При наповненні в тару вводиться лише необхідна кількість розчину, при цьому стінки тари не змочуються розчином, залишаються чистими, що позитивно впливає на чистоту розчину, та відсутність додаткового контакту розчинів із зовнішніми стінками.

Іншим методом об'ємного дозування є системи автоматичного дозування реалізовані на основі витратомірів.

У загальному принципі побудови даних систем вони зазвичай мають аналогічну побудову як і система реалізована на методі шприцевого наповнення. Проте в даній системі замість шприца дозатора на матеріальній лінії дозування встановлено витратомір а також керований відсічний клапан, вмикання якого здійснюється по сигналу наявності пустої тари та вимикання якого здійснюється при досягненні заданої значення витрати. Зазвичай у фармацевтичному виробництві

використовують витратоміри Коріоліса. Витратомір Коріоліса — витратомір, у якому вимірювання масової витрати здійснюється на основі прояву сили Коріоліса. Витратоміри цього типу визначають масову витрату безпосередньо, а не через вимірювання швидкості чи об'єму. Робота витратоміра Коріоліса не залежить ні від тиску рідини, ні від її температури, ні від її в'язкості і густини. Тому такі датчики є універсальними і не вимагають проведення повторних калібрувань і підналагодження під кожен конкретний тип рідкого середовища. [5].

До переваг системи автоматичного дозування реалізованої на основі витратомірів належать:

- технічна простота реалізації системи керування;
- надійність роботи системи;
- універсальність використання незалежно від типу дозованих рідин.

До недоліків вказаних витратомірів та загального методу дозування на основі їх використання можна віднести:

- високу вартість реалізації;
- невисока точність дозування та відтворюваність результатів, хоча витратоміри Коріоліса мають високу точність ($\pm 0,05\%$) та повторюваність ($\pm 0,02\%$) результатів вимірювання, проте в даному випадку слід розглядати систему керування в цілому, у якій точність дозування буде залежати від технічних характеристик вузлів системи керування, а саме їх швидкодії та надійності.

Вагове дозування - один з найточніших і найпопулярніших методів дозування на даний момент. Дозування є дуже важливою частиною виробництва, оскільки від точності дозування компонентів часто залежить якість майбутньої продукції. Вручну дозувати матеріали дуже непрактично, тому на виробництвах використовуються спеціальні машини – дозатори. Дозатори надають можливість видачі точно заданої порції тієї чи іншої речовини.

Опишемо детальніше процес наповнення флакону. Після транспортування та встановлення пустої тари на станцію зважування проводиться зважування тари та визначається її прийнятність встановленим межах ваги. При виконанні цієї умови вважається що тара на даній станції наявна та можливо починати етап наповнення флакону. Процес наповнення відбувається у 3 етапи:

- етап швидкого наповнення;
- етап напівточного наповнення;
- етап точного наповнення.

Етап швидкого наповнення передбачає швидке наповнення флакону до певної ваги де непотрібно контролювати точну вагу наповненого розчину. Даний етап напряму впливає на закладену

продуктивність обладнання та відповідно повинен бути мінімально можливим.

Етап напівточного наповнення – це так званий перехід від грубого дозування до точного дозування. У даному етапі здійснюється плавне зменшення ступеня відкриття перетискної станції та доводячи за певний час та при досяганні певної ваги до ступеня відкриття точного наповнення.

Етап точного наповнення відбувається наприкінці наповнення флакону. Даний етап дозує завершальні декілька грам заданої ваги флакону та відбувається на мінімальному ступені відкриття перетискної станції для досягнення максимальної точності дозування. Загальний вигляд етапів наповнення зображений на рис. 1.

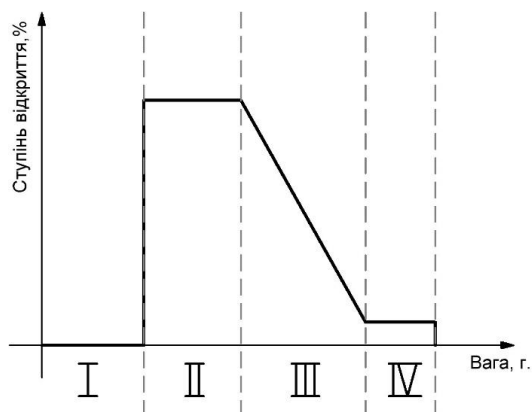


Рисунок 1. Схематичне зображення процесу наповнення тари, де I – етап зважування флакону, II – грубе дозування, III – напівточне дозування, IV – точне дозування

Розглянемо переваги даного методу дозування:

- висока точність дозування;
- відносна дешевизна реалізації;
- висока продуктивність обладнання. При роботі із форматами наповнення 400–200 мл. – 2100 – 2800 шт./год, для формату наповнення 100 мл. – 3000 шт./год.

Недоліки даного методу:

- технічна складність реалізації системи керування;
- складність налаштування параметрів системи керування для виходу на необхідні продуктивності;
- необхідність у висококваліфіковану обслуговуючому та експлуатаційному персоналу.

Розглянувши всі вище описані методи дозування та їх проблематику можемо зробити висновки, що найбільш ефективним для фармацевтичного виробництва є метод вагового наповнення. Проте у ньому існує ряд задач які необхідно та можливо вирішити для покращення його характеристик. Такими задачами є:

- розроблення адаптивного алгоритму дозування, що забезпечить підвищення точності дозування, а також зменшення часу дозування, що в свою чергу збільшить продуктивність обладнання.
- Розроблення адаптивного алгоритму направлено на самонавчання системи для

спрощення методів її налаштування персоналом.

Враховуючи вище описану проблематику авторами для подальших досліджень обрано ваговий (масовий) метод дозування рідких речовин як найбільш перспективний метод.

III. ВИСНОВКИ

В роботі представлено аналіз існуючих методів дозування та наповнення ємностей лікарськими засобами. Розглянуто наступні методи дозування:

- системи дозування базовані на методі шприцевого наповнення;
- системи автоматичного дозування на основі витратомірів;
- системи дозування базовані на методі вагового наповнення.

Перераховано переваги та недоліки кожного із методів, наведено конструктивні особливості типового обладнання наповнення для кожного із методів.

Авторами виконано аналіз технологічних ліній як об'єкта керування та визначено основні керуючі величини, що дасть можливість у подальшому розробити ефективні системи керування технологічними лініями дозування лікарських засобів. Також встановлено, що метод вагового наповнення є перспективним та має потенціал щодо покращення якості дозування. Визначено ряд задач, вирішення яких дасть можливість покращити динамічні характеристики ліній дозування, які сконструйовані за методом вагового наповнення. Такими задачами є :

- розроблення адаптивного алгоритму дозування, що забезпечить підвищення точності дозування, а також зменшення часу дозування, що в свою чергу позитивно вплине на продуктивність обладнання в цілому.
- розроблення алгоритму самонавчання системи для спрощення методів її налаштування персоналом.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2020. Лікарські засоби. Належна виробнича практика. [Чинний від 2020-05-04]. Вид. офіц. Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2020. 356 с.
- [2] СТ-Н МОЗУ 42-3.4:2004. Лікарські засоби. Настанова з якості. Виробництво готових лікарських засобів. [Чинний від 2003-12-31]. Вид. офіц. Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2004. 16 с.
- [3] Фармацевтична енциклопедія України. [Online]. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/>. (Accessed: October 15, 2023).
- [4] Чусєшов В. І., Чернов М. Ю., Хохлова Л. М. Промислова технологія ліків. Том 2. Харків : Основа; Видавництво УкрФА, 1999. 704 с.
- [5] Технологія Коріолісового витратоміра. [Online]. URL: <https://www.smartmeasurement.com/uk/coriolis-flow-meter-technology/>. (Accessed: October 15, 2023).



КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

Проблеми ідентифікації параметрів моделей інфекційного захворювання в умовах дифузійного збурення

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.084>

Сергій Барановський

Кафедра комп'ютерних технологій та економічної кібернетики
 Національний університет водного господарства та природокористування
 м. Рівне, Україна
svbaranovsky@gmail.com

Андрій Бомба

Кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики
 Національний університет водного господарства та природокористування
 м. Рівне, Україна
abomba@ukr.net

Анотація—На прикладі модифікованої моделі інфекційного захворювання, що забезпечує урахування дифузійних збурень та умов логістичної динаміки імунологічних клітин запропоновано окремі алгоритми ідентифікації параметрів дифузійного розсіювання при різних постановках відповідних обернених задач. Модернізовано спеціальну покрокову процедуру для чисельно асимптотичного наближення розв'язку відповідних сингулярно збурених модельних задач із запізненням. Зазначено, що ефективна ідентифікація змінних коефіцієнтів дифузійного розсіювання забезпечить більш точне прогнозування динаміки інфекційного захворювання, що є важливим для підвищення якості прийняття рішень щодо застосування різного роду лікувальних процедур.

Ключові слова—модель інфекційного захворювання, ідентифікація параметрів, динамічні системи, асимптотичні методи, сингулярно збурені задачі

I. ВСТУП

Нааявність інструментарію для ефективного прогнозування динаміки інфекційного захворювання з урахуванням внутрішніх і зовнішніх чинників впливу є важливою передумовою якісного оцінювання можливої реакції організму на збудників хвороби та розроблення оптимальних і персоналізованих програм лікування із застосуванням спеціальних терапевтичних процедур для запобігання надкритичних загострень хвороби, пришвидшення процесу одужання та виведення вірусних елементів з організму.

Описані в [1] моделі інфекційного захворювання, противірусної та протибактеріальної імунної відповіді забезпечують можливість прогнозування загальних тенденцій протікання вірусних інфекцій з урахуванням механізмів гуморального та клітинного типів імунної реакції, а також залишаються основою для створення нових їх модифікацій і узагальнень для урахування різних аспектів імунної відповіді, особливостей протікання онкологічних захворювань, імунодефіцитних станів, застосування імунотерапевтичних та фармакологічних процедур лікування. Приклади такого роду модифікацій та узагальнень базових моделей представлені, зокрема, в [2-4].

У роботі [5] запропоновано підхід для урахування впливу дифузійних збурень діючих чинників на

розвиток вірусного захворювання, а також показано, що зменшення внаслідок дифузійного розсіювання концентрації вірусних елементів в епіцентрі зараження спричиняє зниження прогнозованої гостроти протікання хвороби. У роботах [6, 7] такий підхід узагальнено для урахування різного роду зосереджених впливів, а в [8] – температурної реакції організму.

Протікання інфекційних захворювань визначається впливом багатьох чинників та залежно від потужності реагування імунної системи конкретного організму може розвиватись за різними сценаріями. Для підвищення точності прогнозування динаміки вірусної інфекції необхідно розробити не лише відповідні модифікації та узагальнення базових моделей, але й надійний інструментарій ідентифікації персоналізованих параметрів цих моделей.

Дана робота присвячена ідентифікації параметрів дифузійного розсіювання діючих чинників модифікованої моделі інфекційного захворювання в умовах логістичної динаміки імунологічних клітин.

II. МОДИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ВІРУСНОЇ ІНФЕКЦІЇ ДЛЯ УРАХУВАННЯ ДИFUZІЙНИХ ЗБУРЕНЬ ТА ЛОГІСТИЧНОЇ ДИНАМІКИ

Динаміку модельних компонент процесу вірусної інфекції з урахуванням малого дифузійного розсіювання [5-8] та логістичної динаміки імунологічних клітин описано в області $G = \{(x, y, t) : -\infty < x < +\infty; -\infty < y < +\infty; 0 < t < +\infty\}$ сингулярно збуреною системою нелінійних диференціальних рівнянь із запізненням τ :

$$\begin{aligned} V_t' &= (\beta - \gamma F)V + \varepsilon(D^V V_x')_x + \varepsilon(D^V V_y')_y, \\ C_t' &= \xi(m)\alpha V(x, y, t - \tau)F(x, t - \tau) - \mu_C(C - C^*) + \\ &\quad + \varepsilon^2(D^C C_x')_x + \varepsilon^2(D^C C_y')_y, \\ F_t' &= \omega^F + \rho C(1 - C/C^{**}) - (\mu_f + \eta\gamma V)F + \\ &\quad + \varepsilon(D^F F_x')_x + \varepsilon(D^F F_y')_y, \\ m_t' &= \sigma V - \mu_m m + \varepsilon^2(D^m m_x')_x + \varepsilon^2(D^m m_y')_y \end{aligned} \quad (1)$$

за умов

$$\begin{aligned} C(x, y, 0) &= C^0(x, y), \quad m(x, y, 0) = m^0(x, y), \\ V(x, y, \tilde{t}) &= V^0(x, y, \tilde{t}), \quad F(x, y, \tilde{t}) = F^0(x, y, \tilde{t}), \\ -\tau \leq \tilde{t} \leq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де $V = V(x, y, t)$, $F = F(x, y, t)$, $C = C(x, y, t)$, $m = m(x, y, t)$ – концентрації антигенів, відповідних їм імунних агентів, імунологічних клітин, які продукують ці імунні агенти, значення відносної характеристики ураження органу-мішені антигенами ($0 \leq m \leq 1$) в момент часу t в точці (x, y) ; β – темп розмноження антигенів; γ – коефіцієнт, що враховує результат взаємодії антигенів з імунними агентами; μ_C – величина, обернена тривалості життя імунологічних клітин; α – коефіцієнт стимулювання імунної системи FV -комплексами; C^* – концентрація імунологічних клітин в здоровому організмі, а C^{**} – значення максимально можливої концентрації цих клітин; μ_f – величина, обернена тривалості існування імунних агентів; η – витрати імунних агентів на нейтралізацію одного антигену; σ – темп ураження клітин органу-мішені антигенами; μ_m – швидкість відновлення органу-мішені після його ураження антигенами; ρ – швидкість виробництва імунних агентів однією імунологічною клітиною; $C^0(x, y)$, $m^0(x, y)$, $V^0(x, y, \tilde{t})$, $F^0(x, y, \tilde{t})$ – достатньо гладкі та обмежені функції; εD^V , εD^F , $\varepsilon^2 D^C$, $\varepsilon^2 D^m$ – коефіцієнти дифузійного розсіювання відповідно антигенів, імунних агентів, імунологічних клітин та уражених клітин органу-мішені, ε – малий параметр. Функція $\xi(m)$ призначена для урахування ефекту зниження інтенсивності утворення плазматичних клітин у випадку значного ураження імунологічного органу, а функція $\omega^F(x, y, t)$ служить для опису зосереджених змін концентрації імунних агентів [6,7].

Для знаходження невідомих параметрів D^V , D^F , D^C , D^m разом з функціями V , F , C , m вихідну модельну задачу (1)-(2) необхідно доповнити додатковими «умовами перевизначення» [9]. Такі умови можуть мати різний вид, що зумовлює необхідність розробки і різних способів знаходження розв'язку відповідних обернених задач.

III. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДИФУЗІЙНОГО РОЗСПОВАННЯ ТА ПРОЦЕДУРА ЧИСЕЛЬНО-АСИМПТОТИЧНЕ НАБЛИЖЕННЯ РОЗВ'ЯЗКУ

3.1. Розглянемо ситуацію, коли середовище органу-мішені є анізотропним (причому головні напрямки анізотропії співпадають з напрямками осей координат) і $\bar{D}_{[x]}^V = \bar{D}_{[x]}^V(t)$, $\bar{D}_{[y]}^V = \bar{D}_{[y]}^V(t)$, $\bar{D}_{[x]}^F = \bar{D}_{[x]}^F(t)$, $\bar{D}_{[y]}^F = \bar{D}_{[y]}^F(t)$, $\bar{D}_{[x]}^C = \bar{D}_{[x]}^C(t)$, $\bar{D}_{[y]}^C = \bar{D}_{[y]}^C(t)$, $\bar{D}_{[x]}^m = \bar{D}_{[x]}^m(t)$, $\bar{D}_{[y]}^m = \bar{D}_{[y]}^m(t)$. Якщо умови перевизначення задані у вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{D}_{[x]}^V(t) V'_{x|_{(x^*, y^*)}} &= V_{[x]}^*(t), \bar{D}_{[x]}^C(t) C'_{x|_{(x^*, y^*)}} = C_{[x]}^*(t), \\ \bar{D}_{[x]}^F(t) F'_{x|_{(x^*, y^*)}} &= F_{[x]}^*(t), \bar{D}_{[x]}^m(t) m'_{x|_{(x^*, y^*)}} = m_{[x]}^*(t), \\ \bar{D}_{[y]}^V(t) V'_{y|_{(x^*, y^*)}} &= V_{[y]}^*(t), \bar{D}_{[y]}^C(t) C'_{y|_{(x^*, y^*)}} = C_{[y]}^*(t), \\ \bar{D}_{[y]}^F(t) F'_{y|_{(x^*, y^*)}} &= F_{[y]}^*(t), \bar{D}_{[y]}^m(t) m'_{y|_{(x^*, y^*)}} = m_{[y]}^*(t), \end{aligned} \quad (3)$$

де (x^*, y^*) – деяка характерна точка (наприклад, $(0,0)$), то представимо отриману в результаті оберне-

ну задачу (1)-(3) із запізненням τ , аналогічно до [5-8], у вигляді послідовності задач на проміжках $k\tau \leq t \leq (k+1)\tau$ ($k = 0, 1, \dots$):

$$\begin{aligned} V'_{(k)t} &= (\beta - \gamma F_{(k)}) V_{(k)} + \varepsilon \bar{D}_{[x](k)}^V(t) V_{(k)xx}'' + \\ &\quad + \varepsilon \bar{D}_{[y](k)}^V(t) V_{(k)yy}'' , \\ C'_{(k)t} &= \xi(m) \alpha \Psi_{(k)} - \mu_C (C_{(k)} - C^*) + \\ &\quad + \varepsilon^2 \bar{D}_{[x](k)}^C(t) C_{(k)xx}'' + \varepsilon^2 \bar{D}_{[y](k)}^C(t) C_{(k)yy}'' , \\ F'_{(k)t} &= \omega_{(k)}^F + \rho C_{(k)} (1 - C_{(k)} / C^{**}) - (\mu_f + \eta \gamma V_{(k)}) \times \\ &\quad \times F_{(k)} + \varepsilon \bar{D}_{[x](k)}^F(t) F_{(k)xx}'' + \varepsilon \bar{D}_{[y](k)}^F(t) F_{(k)yy}'' , \\ m'_{(k)t} &= \sigma V_{(k)} - \mu_m m_{(k)} + \varepsilon^2 \bar{D}_{[x](k)}^m(t) m_{(k)xx}'' + \\ &\quad + \varepsilon^2 \bar{D}_{[y](k)}^m(t) m_{(k)yy}'' \end{aligned} \quad (4)$$

за умов

$$\begin{aligned} C_{(k)}(x, y, k\tau) &= C_{(k-1)}(x, y, k\tau), \\ m_{(k)}(x, y, k\tau) &= m_{(k-1)}(x, y, k\tau), \\ V_{(k)}(x, y, k\tau) &= V_{(k-1)}(x, y, k\tau), \\ F_{(k)}(x, y, k\tau) &= F_{(k-1)}(x, y, k\tau), \end{aligned}$$

$$\bar{D}_{[x](k)}^V V'_{(k)x}|_{(0,0)} = V_{[x](k)}^*, \bar{D}_{[x](k)}^C C'_{(k)x}|_{(0,0)} = C_{[x](k)}^*, \quad (5)$$

$$\bar{D}_{[x](k)}^F F'_{(k)x}|_{(0,0)} = F_{[x](k)}^*, \bar{D}_{[x](k)}^m m'_{(k)x}|_{(0,0)} = m_{[x](k)}^*,$$

$$\bar{D}_{[y](k)}^V V'_{(k)y}|_{(0,0)} = V_{[y](k)}^*, \bar{D}_{[y](k)}^C C'_{(k)y}|_{(0,0)} = C_{[y](k)}^*,$$

$$\bar{D}_{[y](k)}^F F'_{(k)y}|_{(0,0)} = F_{[y](k)}^*, \bar{D}_{[y](k)}^m m'_{(k)y}|_{(0,0)} = m_{[y](k)}^*,$$

$$\text{де } C_{(-1)}(x, y, 0) = C^0(x, y), \quad m_{(-1)}(x, y, 0) = m^0(x, y),$$

$$V_{(-1)}(x, y, 0) = V^0(x, y, 0), \quad F_{(-1)}(x, y, 0) = F^0(x, y, 0),$$

$$\Psi_{(k)}(x, y, t) = V_{(k-1)}(x, y, t - \tau) F_{(k-1)}(x, y, t - \tau),$$

$$(k = 1, 2, \dots), \quad \Psi_{(0)}(x, y, t) = V^0(x, y, t - \tau) F^0(x, y, t - \tau).$$

Для наближення розв'язків сингулярно збурених задач (4)-(5) на кожному з цих проміжків, як і в [5-8], застосуємо метод збурення та представимо їх формально у вигляді асимптотичних рядів:

$$\begin{aligned} V_{(k)} &= V_{(k,0)} + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i V_{(k,i)} + R_{(k,n)}^V(x, y, t, \varepsilon), \\ C_{(k)} &= C_{(k,0)} + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i C_{(k,i)} + R_{(k,n)}^C(x, y, t, \varepsilon), \\ F_{(k)} &= F_{(k,0)} + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i F_{(k,i)} + R_{(k,n)}^F(x, y, t, \varepsilon), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} m_{(k)} &= m_{(k,0)} + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i m_{(k,i)} + R_{(k,n)}^m(x, y, t, \varepsilon), \\ \bar{D}_{[x](k)}^V &= \bar{D}_{[x](k,0)}^V + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i \bar{D}_{[x](k,i)}^V + R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[x]}^V}(t, \varepsilon), \\ \bar{D}_{[x](k)}^C &= \bar{D}_{[x](k,0)}^C + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i \bar{D}_{[x](k,i)}^C + R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[x]}^C}(t, \varepsilon), \\ \bar{D}_{[x](k)}^F &= \bar{D}_{[x](k,0)}^F + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i \bar{D}_{[x](k,i)}^F + R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[x]}^F}(t, \varepsilon), \\ \bar{D}_{[x](k)}^m &= \bar{D}_{[x](k,0)}^m + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i \bar{D}_{[x](k,i)}^m + R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[x]}^m}(t, \varepsilon), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\bar{D}_{[y](k)}^V = \bar{D}_{[y](k,0)}^V + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i \bar{D}_{[y](k,i)}^V + R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[y]}^V}(t, \varepsilon),$$

$$\bar{D}_{[y](k)}^C = \bar{D}_{[y](k,0)}^C + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i \bar{D}_{[y](k,i)}^C + R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[y]}^C}(t, \varepsilon),$$

$$\bar{D}_{[y](k)}^F = \bar{D}_{[y](k,0)}^F + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i \bar{D}_{[y](k,i)}^F + R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[y]}^F}(t, \varepsilon),$$

$$\bar{D}_{[y](k)}^m = \bar{D}_{[y](k,0)}^m + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i \bar{D}_{[y](k,i)}^m + R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[y]}^m}(t, \varepsilon),$$

$$\text{де } V_{(k,i)}, C_{(k,i)}, F_{(k,i)}, m_{(k,i)}, \bar{D}_{[x](k,i)}^V, \bar{D}_{[x](k,i)}^C,$$

$\bar{D}_{[x](k,i)}^F$, $\bar{D}_{[x](k,i)}^m$, $\bar{D}_{[y](k,i)}^V$, $\bar{D}_{[y](k,i)}^C$, $\bar{D}_{[x](k,i)}^F$, $\bar{D}_{[y](k,i)}^m$
 $(i = 0, \dots, n)$ – шукані функції (члени асимптотики);
 $R_{(k,n)}^V$, $R_{(k,n)}^C$, $R_{(k,n)}^F$, $R_{(k,n)}^m$, $R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[x]}}^V$, $R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[x]}}^C$, $R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[x]}}^F$, $R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[x]}}^m$,
 $R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[y]}}^V$, $R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[y]}}^C$, $R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[y]}}^F$, $R_{(k,n)}^{\bar{D}_{[y]}}^m$ – відповідні залишкові
 члени. Аналогічно до [5-8], після підстановки (6), (7)
 в (4)-(5) та реалізації стандартної «процедури
 прирівнювання» отримуємо задачі для знаходження
 функцій $V_{(k,i)}(x, y, t)$, $C_{(k,i)}(x, y, t)$, $F_{(k,i)}(x, y, t)$,
 $m_{(k,i)}(x, y, t)$. При цьому невідомі функції $\bar{D}_{[x](k,i)}^V$,
 $\bar{D}_{[x](k,i)}^C$, $\bar{D}_{[x](k,i)}^F$, $\bar{D}_{[x](k,i)}^m$, $\bar{D}_{[y](k,i)}^V$, $\bar{D}_{[y](k,i)}^C$, $\bar{D}_{[y](k,i)}^F$,
 $\bar{D}_{[y](k,i)}^m$ виражаються через вже знайдені раніше
 члени асимптотики, а саме $(i = 2, \dots, n)$:

$$\begin{aligned}
 \bar{D}_{[x](k,0)}^V(t) &= V_{[x]}^*(t)/V'_{(k,0)x}(0, 0, t), \\
 \bar{D}_{[x](k,0)}^F(t) &= F_{[x]}^*(t)/F'_{(k,0)x}(0, 0, t), \\
 \bar{D}_{[x](k,0)}^C(t) &= C_{[x]}^*(t)/C'_{(k,0)x}(0, 0, t), \\
 \bar{D}_{[x](k,0)}^m(t) &= m_{[x]}^*(t)/m'_{(k,0)x}(0, 0, t), \\
 \bar{D}_{[y](k,0)}^V(t) &= V_{[y]}^*(t)/V'_{(k,0)y}(0, 0, t), \\
 \bar{D}_{[y](k,0)}^F(t) &= F_{[y]}^*(t)/F'_{(k,0)y}(0, 0, t), \\
 \bar{D}_{[y](k,0)}^C(t) &= C_{[y]}^*(t)/C'_{(k,0)y}(0, 0, t), \\
 \bar{D}_{[y](k,0)}^m(t) &= m_{[y]}^*(t)/m'_{(k,0)y}(0, 0, t), \\
 \bar{D}_{[x](k,i-1)}^V(t) &= -\frac{\sum_{r=0}^{i-2} \bar{D}_{[x](k,r)}^V(t) V'_{(k,i-r-1)x}(0, 0, t)}{V'_{(k,0)x}(0, 0, t)}, \\
 \bar{D}_{[x](k,i-1)}^C(t) &= -\frac{\sum_{r=0}^{i-2} \bar{D}_{[x](k,r)}^C(t) C'_{(k,i-r-1)x}(0, 0, t)}{C'_{(k,0)x}(0, 0, t)}, \\
 \bar{D}_{[x](k,i-1)}^F(t) &= -\frac{\sum_{r=0}^{i-2} \bar{D}_{[x](k,r)}^F(t) F'_{(k,i-r-1)x}(0, 0, t)}{F'_{(k,0)x}(0, 0, t)}, \\
 \bar{D}_{[x](k,i-1)}^m(t) &= -\frac{\sum_{r=0}^{i-2} \bar{D}_{[x](k,r)}^m(t) m'_{(k,i-r-1)x}(0, 0, t)}{m'_{(k,0)x}(0, 0, t)}, \\
 \bar{D}_{[y](k,i-1)}^V(t) &= -\frac{\sum_{r=0}^{i-2} \bar{D}_{[y](k,r)}^V(t) V'_{(k,i-r-1)y}(0, 0, t)}{V'_{(k,0)y}(0, 0, t)}, \\
 \bar{D}_{[y](k,i-1)}^C(t) &= -\frac{\sum_{r=0}^{i-2} \bar{D}_{[y](k,r)}^C(t) C'_{(k,i-r-1)y}(0, 0, t)}{C'_{(k,0)y}(0, 0, t)}, \\
 \bar{D}_{[y](k,i-1)}^F(t) &= -\frac{\sum_{r=0}^{i-2} \bar{D}_{[y](k,r)}^F(t) F'_{(k,i-r-1)y}(0, 0, t)}{F'_{(k,0)y}(0, 0, t)}, \\
 \bar{D}_{[y](k,i-1)}^m(t) &= -\frac{\sum_{r=0}^{i-2} \bar{D}_{[y](k,r)}^m(t) m'_{(k,i-r-1)y}(0, 0, t)}{m'_{(k,0)y}(0, 0, t)}.
 \end{aligned}$$

3.2. Розглянемо тепер ситуацію, коли значення
 невідомих параметрів залежать від просторових
 координат: $\bar{D}_{[x]}^V = \bar{D}_{[x]}^V(x, y)$, $\bar{D}_{[y]}^V = \bar{D}_{[y]}^V(x, y)$, $\bar{D}_{[x]}^F =$
 $= \bar{D}_{[x]}^F(x, y)$, $\bar{D}_{[y]}^F = \bar{D}_{[y]}^F(x, y)$, $\bar{D}_{[x]}^C = \bar{D}_{[x]}^C(x, y)$, $\bar{D}_{[y]}^C =$
 $= \bar{D}_{[y]}^C(x, y)$, $\bar{D}_{[x]}^m = \bar{D}_{[x]}^m(x, y)$, $\bar{D}_{[y]}^m = \bar{D}_{[y]}^m(x, y)$, а в
 якості умов перевизначення задані значення
 локальних густин дифузійних потоків у напрямках

осей координат у початковий момент часу:

$$\begin{aligned}
 \tilde{D}_{[x]}^V(x, y) V'_x|_{t=0} &= V_{[x]}^0(x, y), \\
 \tilde{D}_{[x]}^C(x, y) C'_x|_{t=0} &= C_{[x]}^0(x, y), \\
 \tilde{D}_{[x]}^F(x, y) F'_x|_{t=0} &= F_{[x]}^0(x, y), \\
 \tilde{D}_{[x]}^m(x, y) m'_x|_{t=0} &= m_{[x]}^0(x, y), \\
 \tilde{D}_{[y]}^V(x, y) V'_y|_{t=0} &= V_{[y]}^0(x, y), \\
 \tilde{D}_{[y]}^C(x, y) C'_y|_{t=0} &= C_{[y]}^0(x, y), \\
 \tilde{D}_{[y]}^F(x, y) F'_y|_{t=0} &= F_{[y]}^0(x, y), \\
 \tilde{D}_{[y]}^m(x, y) m'_y|_{t=0} &= m_{[y]}^0(x, y).
 \end{aligned} \tag{8}$$

У цьому випадку, використовуючи (2), спочатку
 знаходимо значення похідних концентрацій діючих
 чинників: $V'_x|_{t=0} = (V^0(x, y, 0))'_x$, $C'_x|_{t=0} = (C^0(x, y))'_x$,
 $F'_x|_{t=0} = (F^0(x, y, 0))'_x$, $m'_x|_{t=0} = (m^0(x, y))'_x$, $V'_y|_{t=0} =$
 $= (V^0(x, y, 0))'_y$, $C'_y|_{t=0} = (C^0(x, y))'_y$, $F'_y|_{t=0} =$
 $= (F^0(x, y, 0))'_y$, $m'_y|_{t=0} = (m^0(x, y))'_y$, а потім, вико-
 ристовуючи умови (8), знаходимо шукані параметри
 дифузійного розсіювання:

$$\begin{aligned}
 \tilde{D}_{[x]}^V(x, y) &= V_{[x]}^0(x, y) / (V^0(x, y, 0))'_x, \\
 \tilde{D}_{[x]}^C(x, y) &= C_{[x]}^0(x, y) / (C^0(x, y))'_x, \\
 \tilde{D}_{[x]}^F(x, y) &= F_{[x]}^0(x, y) / (F^0(x, y, 0))'_x, \\
 \tilde{D}_{[x]}^m(x, y) &= m_{[x]}^0(x, y) / (m^0(x, y))'_x, \\
 \tilde{D}_{[y]}^V(x, y) &= V_{[y]}^0(x, y) / (V^0(x, y, 0))'_y, \\
 \tilde{D}_{[y]}^C(x, y) &= C_{[y]}^0(x, y) / (C^0(x, y))'_y, \\
 \tilde{D}_{[y]}^F(x, y) &= F_{[y]}^0(x, y) / (F^0(x, y, 0))'_y, \\
 \tilde{D}_{[y]}^m(x, y) &= m_{[y]}^0(x, y) / (m^0(x, y))'_y.
 \end{aligned}$$

3.3. У ситуації, коли невідомі параметри
 дифузійного розсіювання можуть бути представлені
 як добутки: $D_{[x]}^V = \bar{D}_{[x]}^V(x, y) \cdot \bar{D}_{[x]}^V(t)$, $D_{[x]}^F = \bar{D}_{[x]}^F(x, y) \times$
 $\times \bar{D}_{[x]}^F(t)$, $D_{[x]}^C = \bar{D}_{[x]}^C(x, y) \bar{D}_{[x]}^C(t)$, $D_{[x]}^m = \bar{D}_{[x]}^m(x, y) \times$
 $\times \bar{D}_{[x]}^m(t)$, $D_{[y]}^V = \bar{D}_{[y]}^V(x, y) \cdot \bar{D}_{[y]}^V(t)$, $D_{[y]}^F = \bar{D}_{[y]}^F(x, y) \times$
 $\times \bar{D}_{[y]}^F(t)$, $D_{[y]}^C = \bar{D}_{[y]}^C(x, y) \bar{D}_{[y]}^C(t)$, $D_{[y]}^m = \bar{D}_{[y]}^m(x, y) \times$
 $\times \bar{D}_{[y]}^m(t)$, а умови перевизначення задані у вигляді:

$$\begin{aligned}
 \bar{D}_{[x]}^V(x, y) V'_x|_{t=0} &= \tilde{V}_{[x]}^0(x, y), \bar{D}_{[x]}^C(x, y) C'_x|_{t=0} = \tilde{C}_{[x]}^0(x, y), \\
 \bar{D}_{[x]}^F(x, y) F'_x|_{t=0} &= \tilde{F}_{[x]}^0(x, y), \bar{D}_{[x]}^m(x, y) m'_x|_{t=0} = \tilde{m}_{[x]}^0(x, y), \\
 \bar{D}_{[y]}^V(x, y) V'_y|_{t=0} &= \tilde{V}_{[y]}^0(x, y), \bar{D}_{[y]}^C(x, y) C'_y|_{t=0} = \tilde{C}_{[y]}^0(x, y), \\
 \bar{D}_{[y]}^F(x, y) F'_y|_{t=0} &= \tilde{F}_{[y]}^0(x, y), \bar{D}_{[y]}^m(x, y) m'_y|_{t=0} = \tilde{m}_{[y]}^0(x, y), \\
 \bar{D}_{[x]}^V(t) V'_x|_{(0,0)} &= \tilde{V}_{[x]}^*(t), \bar{D}_{[x]}^C(t) C'_x|_{(0,0)} = \tilde{C}_{[x]}^*(t), \\
 \bar{D}_{[x]}^F(t) F'_x|_{(0,0)} &= \tilde{F}_{[x]}^*(t), \bar{D}_{[x]}^m(t) m'_x|_{(0,0)} = \tilde{m}_{[x]}^*(t), \\
 \bar{D}_{[y]}^V(t) V'_y|_{(0,0)} &= \tilde{V}_{[y]}^*(t), \bar{D}_{[y]}^C(t) C'_y|_{(0,0)} = \tilde{C}_{[y]}^*(t), \\
 \bar{D}_{[y]}^F(t) F'_y|_{(0,0)} &= \tilde{F}_{[y]}^*(t), \bar{D}_{[y]}^m(t) m'_y|_{(0,0)} = \tilde{m}_{[y]}^*(t),
 \end{aligned}$$

як і у попередньому випадку, використовуючи
 умови (2), знаходимо спочатку значення залежних
 від просторової змінної компоненти невідомих

параметрів дифузійного розсіювання:

$$\tilde{D}_{[x]}^V(x, y) = \tilde{V}_{[x]}^o(x, y) / (V^0(x, y, 0))'_x,$$

$$\tilde{D}_{[x]}^C(x, y) = \tilde{C}_{[x]}^o(x, y) / (C^0(x, y))'_x,$$

$$\tilde{D}_{[x]}^F(x, y) = \tilde{F}_{[x]}^o(x, y) / (F^0(x, y, 0))'_x,$$

$$\tilde{D}_{[x]}^m(x, y) = \tilde{m}_{[x]}^o(x, y) / (m^0(x, y))'_x,$$

$$\tilde{D}_{[y]}^V(x, y) = \tilde{V}_{[y]}^o(x, y) / (V^0(x, y, 0))'_y,$$

$$\tilde{D}_{[y]}^C(x, y) = \tilde{C}_{[y]}^o(x, y) / (C^0(x, y))'_y,$$

$$\tilde{D}_{[y]}^F(x, y) = \tilde{F}_{[y]}^o(x, y) / (F^0(x, y, 0))'_y,$$

$$\tilde{D}_{[y]}^m(x, y) = \tilde{m}_{[y]}^o(x, y) / (m^0(x, y))'_y.$$

Далі, застосувавши аналогічно до 3.1 процедуру поетапного чисельно-асимптотичного наближення розв'язку модельної задачі, знаходимо функції $V_{(k,i)}(x, y, t)$, $C_{(k,i)}(x, y, t)$, $F_{(k,i)}(x, y, t)$, $m_{(k,i)}(x, y, t)$ та шукані значення: $\bar{D}_{[x]}^V(t)$, $\bar{D}_{[x]}^F(t)$, $\bar{D}_{[x]}^C(t)$, $\bar{D}_{[x]}^m(t)$, $\bar{D}_{[y]}^V(t)$, $\bar{D}_{[y]}^F(t)$, $\bar{D}_{[y]}^C(t)$, $\bar{D}_{[y]}^m(t)$.

Значимо, що значення шуканих функцій $V_{(k,i)}(x, y, t)$, $C_{(k,i)}(x, y, t)$, $F_{(k,i)}(x, y, t)$, $m_{(k,i)}(x, y, t)$ знайдемо чисельними методами шляхом послідовного розв'язання відповідних задач із застосуванням надійних пакетів відповідного програмного забезпечення (див., наприклад, [11]). Якщо вихідні функції задані у дискретній формі (наприклад, як результати лабораторних методів обстеження), то застосуємо для них процедуру, наприклад, чебишовського наближення функції сумою многочлена й виразу аналогічно до [12, 13]. Встановлення просторово-часових проміжків збіжності та оцінка залишкових членів здійснюється аналогічно до [5-8; 14].

IV. ВИСНОВКИ

На основі модифікації моделі інфекційного захворювання, що забезпечує урахування дифузійних збурень та логістичної динаміки імунологічних клітин запропоновано окремі підходи щодо ідентифікації невідомих параметрів дифузійного розсіювання діючих чинників для різних типів функціональної залежності коефіцієнта дифузії та заданих умов перевизначення. Для знаходження розв'язку вихідної модельної сингулярно збуреної задачі із запізненням та невідомими параметрами модернізовано ефективну покрокову процедуру чисельно-асимптотичного наближення відповідної послідовності задач без запізнення.

Потрібно підкреслити, що урахування в моделях інфекційних захворювань змінних коефіцієнтів дифузії забезпечує більш точне прогнозування протікання хвороби, а, отже, і можливість формування більш ефективних програм лікування. При цьому необхідна для якісної ідентифікації невідомих параметрів дифузійного розсіювання додаткова інформація може бути отримана шляхом проведення за спеціальною процедурою окремих лабораторних досліджень.

Природною перспективою розвитку представленого підходу є його розвиток для випадків моделювання інфекційного захворювання з урахуванням конвекції, температурної реакції організму, змішаних інфекцій в умовах фармако- та імунотерапії.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] G. I. Marchuk. Mathematical models of immune response in infectious diseases. Dordrecht: Kluwer Press, 1997. URL: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8798-3>.
- [2] G. Bocharov, V. Volpert, B. Ludewig, and A. Meyerhans. Mathematical Immunology of Virus Infections. Cham: Springer, 2018.
- [3] B. de M. Quintela, R.W. dos Santos, and M. Lobosco. On the coupling of two models of the human immune response to an antigen. BioMed Research International. 2014. Vol. 2014.
- [4] J. C. Chimal-Eguia. Mathematical Model of Antiviral Immune Response against the COVID-19 Virus. *Mathematics*. 2021. Vol. 9(12). 1356.
- [5] A. Bomba, S. Baranovsky, M. Pasichnyk, and O. Prysychcha. Modelling of the Infectious Disease Process with Taking into Account of Small-Scale Spatially Distributed Influences. *2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Zbarazh, Ukraine, 2020. Vol. 2. Pp. 62–65, doi: 10.1109/CSIT49958.2020.9322047.
- [6] A. Bomba, S. Baranovskii, M. Pasichnyk, and K. Malash. Modeling of Infectious Disease Dynamics under the Conditions of Spatial Perturbations and Taking into account Impulse Effects. *Proceedings of the 3rd International Conference on Informatics & Data-Driven Medicine (IDDM 2020)*, Växjö, Sweden, November 19-21, 2020. pp. 119–128.
- [7] S.V. Baranovsky, A.Ya. Bomba, and S.I. Lyashko, "Generalization of the antiviral immune response model for complex consideration of diffusion perturbations, body temperature response, and logistic antigen population dynamics," *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58(4). Pp. 576–592. URL: <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00491-w>.
- [8] A. Bomba, S. Baranovsky, O. Blavatska, and L. Bachyshyna, "Infectious disease model generalization based on diffuse perturbations under conditions of body's temperature reaction." *Computers in Biology and Medicine*. 2022. Vol. 146. 105561. URL: <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.105561>.
- [9] M. Ivanchov, "Inverse problems for equations of parabolic type," Lviv: VNTL Publ., 2003.
- [10] Бомба А.Я., Сафоник А.П., Фурсачик О.А. Розв'язання обернених сингулярно збурених задач – математичних моделей процесів фільтрування. *Математичне моделювання*, 2009. Вип. 1(20). С. 62–65.
- [11] K. Soetaert, J.R. Cash, and F. Mazzia, "Solving Differential Equations in R," Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG, 2012.
- [12] P. S. Malachivskyy, L.S. Melnychok, and Y.V. Pizyur, "Chebyshev approximation of multivariable functions by the exponential expression." *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57(3). Pp. 429–435. URL: <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00367-5>.
- [13] P. S. Malachivskyy, Ya. V. Pizyur, N. V. Danchak, and E. B. Orazov. Chebyshev approximation by exponential-power expression. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2013. vol. 49(6). Pp. 877–881. URL: <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9577-1>.
- [14] A. B. Vasil'eva, V. F. Butuzov, and N. N. Nefedov. Singularly perturbed problems with boundary and internal layers. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. 2010. Vol. 268. Pp. 258–273. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0081543810010189>.

Підхід до прогнозування поширення COVID-19 у Тернопільській області

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.085>

Василь Марценюк

Кафедра комп'ютерних технологій
Університет в Бельсько-Бяла
м. Бельсько-Бяла, Польща
vmartsenyuk@ath.bielsko.pl

Андрій Сверстюк

Кафедра медичної інформатики
Тернопільський національний медичний університет
імені І.Я. Горбачевського МОЗ України
м. Тернопіль, Україна
sverstyuk@tdmu.edu.ua

Володимир Паничев

ДУ «Тернопільський обласний лабораторний центр
МОЗ України»
м. Тернопіль, Україна
vpanychev9@gmail.com

Михайло Андрейчин

Кафедра інфекційних хвороб
Тернопільський національний медичний університет
імені І.Я. Горбачевського МОЗ України
м. Тернопіль, Україна
andreychyn@tdmu.edu.ua

Оксана Багрій-Заяць

Кафедра медичної фізики діагностичного та
лікувального обладнання
Тернопільський національний медичний університет
імені І.Я. Горбачевського МОЗ України
м. Тернопіль, Україна
bagrijzayats@tdmu.edu.ua

Світлана Никитюк

Кафедра дитячих хвороб з дитячою хірургією
Тернопільський національний медичний університет
імені І.Я. Горбачевського МОЗ України
м. Тернопіль, Україна
androx@tdmu.edu.ua

Анотація — Отримано результати експериментальних досліджень кількості прогнозованих випадків інфікування та осіб, які одужали, з використанням SIR-моделі розповсюдження пандемії COVID-19 на основі лінійних і нелінійних диференціальних рівнянь на 60, 100 та 1000 діб. Абсолютна похибка прогнозування піку пандемії COVID-19 у Тернопільській області на основі SIR-моделі з використанням нелінійних диференціальних рівнянь становить 10 діб, що пояснюється введенням своєчасних та ефективних заходів Центром громадського здоров'я МОЗ України та ДУ «Тернопільський обласний лабораторний центр МОЗ України».

Ключові слова — пандемія COVID-19, SIR-модель, методи прогнозування.

І. ВСТУП

За даними ВООЗ, у найближчі роки очікується зростання інфекційної захворюваності, що обумовлено відомими екологічними і соціально-економічними проблемами – низьким рівнем життя та не завжди належною медичною допомогою у значній частині населення планети [1]. Згідно з прогнозами, в першій половині поточного століття у будь-якій географічній точці планети слід чекати епідемій, пандемій або спалахів як «нових», так і «старих» інфекційних захворювань.

Основними чинниками, які зумовлюють складність вирішення задач оперативного аналізу та прогнозу розвитку пандемії COVID-19, а також завдань протидії, є наступні: масовість і висока

швидкість розповсюдження патогенів, коли за короткий час можлива поява великого числа хворих людей; обмеженість щодо кількості пацієнтів, яких можуть прийняти медичні установи та заклади охорони здоров'я, коли уражених людей стає надзвичайно багато, а наявних сил і засобів протидії новому вірусу мало; необхідність швидкого (оперативного) аналізу і прогнозу епідемічної ситуації з ухваленням адекватного рішення стосовно мобілізації та управління усіма наявними засобами протидії з метою виявлення, локалізації та ліквідації епідемічних осередків COVID-19, а також мінімізації соціальних та інших наслідків [2–5]. У цих умовах особливого значення набувають випереджувальні наукові дослідження з аналізу і прогнозування вірогідних сценаріїв розвитку пандемії COVID-19. Технології математичного і комп'ютерного моделювання такого роду досліджень, використовуючи адекватний науковий інструментарій, спроможні своєчасно оцінити масштаби та наслідки пандемії.

Метою роботи було розробити методи аналізу та прогнозування розповсюдження пандемії COVID-19 у Тернопільській області на основі SIR-моделей. Перші математичні методи при вивченні епідемій використовувалися у середині XVII століття. Зокрема Данієл Бернуллі уперше застосував найпростіший математичний апарат для оцінки ефективності профілактичних щеплень проти віспи.

Найбільший прогрес у використанні методів моделювання пов'язується з появою в середині 50-х років XX століття перших електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) та збільшенням

числа наукових робіт і публікацій з математичного і комп'ютерного моделювання епідемій. У публікаціях того часу стали з'являтися все складніші математичні моделі, в яких істотну роль відведено випадковим чинникам епідемічного процесу. Тому більшість моделей того періоду мала імовірнісний характер, а робочим апаратом служила теорія імовірності та випадкових процесів. Цей етап у розвитку ЕОМ був пов'язаний з впливом на епідеміологію класичних математиків, яким вдалося створити безліч абстрактних моделей, але з вельми обмеженим епідеміологічним змістом [6].

Як було встановлено, у ході розвитку епідемії серед населення ураженої території формується складний процес, що саморозвивається, завдяки «перенесенню» популяції збудника на співтовариство сприйнятливих людей. Епідеміологічний зміст такого процесу пов'язаний з адекватним його відображенням як у календарному часі «t», так і внутрішньому часі «τ», який фіксує розвиток інфекційного захворювання у безлічі інфікованих осіб. Система рівнянь, що показує розвиток епідемічного процесу, є системою нелінійних рівнянь частинних похідних з відповідними початковими і граничними умовами. Із застосуванням цієї методології в Інституті експериментальної медицини ім. М.Ф. Гамалей АМН СРСР в 60-70-ті роки були розроблені унікальні моделі епідемій грипу для території СРСР, які складено на основі балансів «потоків» індивідуумів, що проходять основні стадії-стани інфекційного процесу типу SEIR, де: S – сприйнятливі люди, E – особи в інкубаційному періоді захворювання, I – інфекційні хворі, R – особи, які перехворіли.

За відсутності інформації про кількість пацієнтів, які перебувають в інкубаційному періоді інфекції, для розробки методів аналізу та прогнозування розповсюдження пандемії COVID-19 в Тернопільській області доцільно використовувати SIR-модель.

II. SIR- МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПАНДЕМІЇ COVID-19 НА ОСНОВІ ЛІНІЙНИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ

Використовуючи основні положення популяційної динаміки на основі біологічних припущень, SIR-модель розповсюдження пандемії COVID-19 на основі лінійних диференціальних рівнянь буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -k_1 \cdot S(t), \\ \frac{dI}{dt} &= k_1 \cdot S(t) - k_2 \cdot I(t), \\ \frac{dR}{dt} &= k_2 \cdot I(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Модель (1) використовується для заданих початкових умов $S(0)=0$, $I(0)=0$ та $R(0)=0$. SIR-модель розповсюдження пандемії COVID-19 має спрощений характер та не враховує процеси підпопуляції померлих осіб внаслідок інфікування. Однак, беручи до уваги їх дуже мале число, вважається, що дана підпопуляція не впливає на якісну поведінку динамічної системи (1). Наведена модель є стаціонарною (автономною), в якій не

враховуються жодні сезонні зміни. Для прогнозування пандемії COVID-19 з використанням SIR-моделі на основі нелінійних диференціальних рівнянь (1) необхідно провести ідентифікацію параметрів k_1 та k_2 . У ролі експериментальних даних використано результати розвитку пандемії COVID-19 в Тернопільській області, згідно з інформацією, яка надана ДУ «Тернопільський обласний лабораторний центр МОЗ України» з 01.03. по 5.05.2020 р.

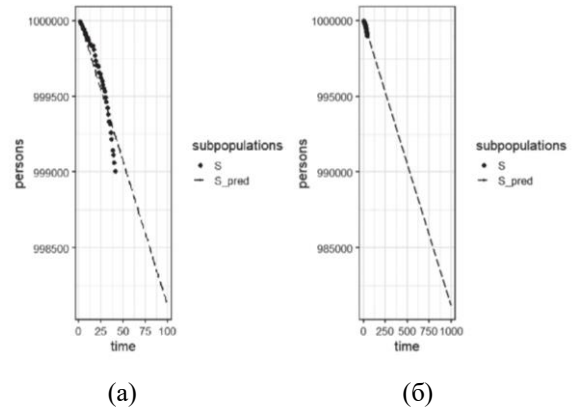


Рисунок 1. Результати експериментальних досліджень числа інфікованих (S) та їх прогнозування (S_pred) з використанням моделі (1) на 100 діб (а) та 1 000 діб (б)

III. SIR- МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПАНДЕМІЇ COVID-19 НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ

Використовуючи основні положення популяційної динаміки на основі біологічних припущень, які наведені вище, SIR-модель розповсюдження пандемії COVID-19 на основі нелінійних диференціальних рівнянь буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -k_1 \cdot S(t) \cdot I(t), \\ \frac{dI}{dt} &= k_1 \cdot S(t) \cdot I(t) - k_2 \cdot I(t), \\ \frac{dR}{dt} &= k_2 \cdot I(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Модель (2) використовується для заданих початкових умов $S(0)=0$, $I(0)=0$ та $R(0)=0$. SIR-модель розповсюдження пандемії COVID-19 має спрощений характер і не враховує процеси підпопуляції померлих осіб внаслідок інфікування, однак, беручи до уваги їх дуже малу кількість, можна вважати, що ця популяція не впливає на якісну поведінку динамічної системи (1). Наведена модель є стаціонарною (автономною), в якій не враховуються жодні сезонні зміни.

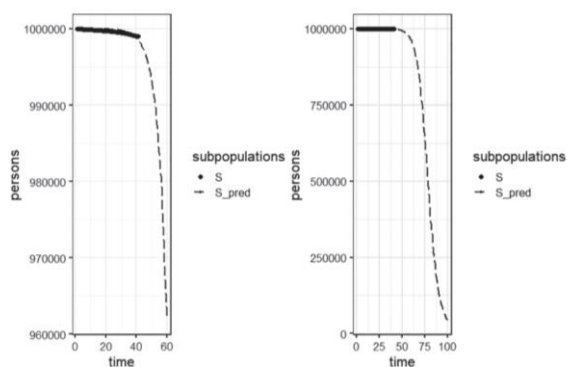


Рисунок 2. Результати експериментальних досліджень числа інфікованих (S) та їх прогнозування (S_{pred}) з використанням моделі (2) на 60 діб (а) та 100 діб (б)

Проводилося дослідження впливу розміру популяції на досягнення максимального значення кількості інфікованих осіб (піку епідемії) (рис.1, 2). Пік пандемії COVID-19 в Тернопільській області, на підставі інформації, яка надана ДУ «Тернопільський обласний лабораторний центр МОЗ України» на період з 01.03. по 5.05.2020 р., мав би настати на 85-у добу, тобто приблизно 16.05.2020 р., згідно з прогнозуванням пандемії COVID-19 на основі SIR-моделі з використанням нелінійних диференціальних рівнянь.

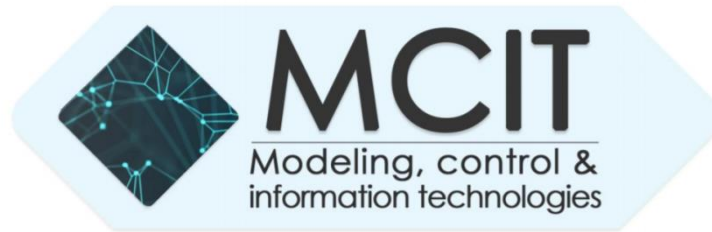
IV. ВИСНОВКИ

За результатами обліку кількості інфікованих на COVID-19 в Тернопільській області екстремальне значення зростання пандемії на COVID-19 в

Тернопільській області припав на 06.05.2020 р. Абсолютна похибка прогнозування піку пандемії COVID-19 в Тернопільській області на основі SIR-моделі з використанням нелінійних диференціальних рівнянь становить 10 діб. Це пояснюється введенням своєчасних та ефективних протиепідемічних заходів Центром громадського здоров'я МОЗ України та ДУ «Тернопільський обласний лабораторний центр МОЗ України».

ЛІТЕРАТУРА

- [1] М. А. Андрейчин, В. С. Копча. Проблеми грипу А Н1/Н1: минуле і сучасність. *Інфекційні хвороби*. 2009. Vol. 4. С. 5–19.
- [2] L. Wang, J. Li, S. Guo, N. Xie, L. Yao, Y. Cao [et al.]. Real-time estimation and prediction of mortality caused by COVID-19 with patient information based algorithm. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 727. Pp. 1–8.
- [3] В. П. Марценюк, Н. В. Цяпа, М. О. Кашуба. Інформаційно-статистичний підхід до моделювання розповсюдження інфекційного захворювання на прикладі епідемії ГРЗ в період жовтень-листопад 2009 року в Тернопільській області. *Інфекційні хвороби*. 2009. Vol. 4. С. 50–59.
- [4] В. Марценюк, Н. Цяпа. SIR-моделювання епідемії гострих респіраторних захворювань. *Медична інформатика та інженерія*. 2009. Vol. 4. С. 65–69.
- [5] В. О. Паничев, М. А. Андрейчин, А. С. Сверстюк. Оцінювання повноти реєстрації кліщових інфекцій на Тернопіллі. *Інфекційні хвороби*. 2023. Vol. 1 (111). С. 18–28.
- [6] В.П. Марценюк, М.А. Андрейчин, А.С. Сверстюк, О.Т. Чайчук, В.О. Паничев, В.С. Копча. Ідентифікація параметрів у SIR-моделях за результатами пандемії COVID-19 в Тернопільській області. *Інфекційні хвороби*. 2020. Vol. 2 (100). С. 15–21.



РОЗУМНІ МЕРЕЖІ ТА РОЗУМНІ СПОЖИВАЧІ

Підтримання балансу шахтних вод поствугільних регіонів за рахунок фотоелектричної генерації

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.086>

С.В. Василець

Кафедра автоматизації, електротехнічних та
комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
s.vasylets@nuwm.edu.ua

К.С. Василець

Кафедра автоматизації, електротехнічних та
комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
k.s.vasylets@nuwm.edu.ua

В.В. Ільчук

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
v.v.ilchuk@nuwm.edu.ua

Анотація—Запропоновано метод оцінювання оптимальної встановленої потужності фотоелектричної станції для живлення головного водовідливу закритої шахти. В якості критерія оптимізації обрано наближення до нуля річного сальдо по оплаті за електроенергію. Такий підхід суттєво знизить навантаження на бюджет громади. Реалізації електростанції оптимальної конфігурації забезпечить підтримання балансу шахтних вод поствугільних регіонів та знизить імовірність підтоплення, провалів ґрунту, заболочення земель.

Ключові слова—водовідлив; насос; фотоелектрична станція; оптимізація потужності; закрыта шахта.

I. АКТУАЛЬНІСТЬ ПИТАННЯ

Деокупація східних регіонів України запустить процес їх трансформації відповідно до Державної програми [1]. Масове неконтрольоване затоплення шахт призводить до суттєвих екологічних проблем. Досвід закриття шахт у Польщі свідчить про підвищення рівня та погіршення якості підземних вод [2]. Також це збільшує імовірність провалів ґрунту, підтоплення будівель, заболочування угідь.

Дієвим способом підтримання підземних вод на допустимому рівні є продовження роботи головних водовідливів після закриття шахт. Найбільшу частку у структурі витрат при такому підході займає вартість електроенергії, оскільки загальна потужність двигунів може перевищувати декілька МВт, час роботи – до 10 годин на добу, висота підйому води – до 1000 м [3]. Це обумовлює актуальність пошуку шляхів зниження витрат на роботу насосних агрегатів шахт, що працюють в режимі водовідливу.

Відомо спосіб зниження (до 25%) вартості відкачування шахтних вод шляхом ввімкнення

насосів у час найнижчої ціни на електроенергію [3]. Проте відсутність відповідності між необхідним часом для відкачування всього обсягу водозбірника та періодом найнижчої ціни знижують ефективність такого способу. Також можливе розташування гравітаційних накопичувачів енергії в стовбурах закритих шахт [4] та обладнувати у підземних виробках сховища із стисненим повітрям [5], де можна накопичувати дешеву електроенергію з подальшим використанням для відкачування води. Проте, накопичений обсяг енергії є недостатнім для функціонування головного водовідливу. Перспективним шляхом мінімізації енергоспоживання головного водовідливу є обладнання фотоелектричної станції (ФЕС). Наприклад, розрахунки для шахт Північного Онтаріо, Канада, визначають ефективність такого підходу [6].

Більшість відомих рішень щодо використання сонячної енергії для перекачування води орієнтовані на незначні потужності у порівнянні з шахтними насосами. Це обмежує їх впровадження на закритих вугільних підприємствах. Крім того, найкращим рішенням для закритих шахт може бути зниження до нуля фінансових витрат на відкачування підземних вод, оскільки ні громади, ні центральний бюджет не готові до таких видатків. Це обумовлює необхідність розроблення методики визначення оптимальної, за критерієм наближення до нуля вартості електроенергії, потужності ФЕС для живлення головної водовідливної установки закритої шахти.

Мета – підвищення ефективності підтримання балансу шахтних вод поствугільних регіонів за рахунок оптимізації потужності фотоелектричної станції за критерієм наближення до нуля вартості електроенергії.

II. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження здійснюються з використанням Simulink-моделі головного водовідливу шахти «Білицька» (м. Добропілля, Україна) горизонту 500 м з двома відцентровими багатоступінчатими насосами ЦНС300-600, які обладнані двигунами ВАО2-560LA4 (800 кВт, 6 кВ). Водоприплив становить 200–250 м³/год і при моделюванні представляється реалізацією випадкового процесу. Додаткова Simulink-модель використовується для оцінювання енергоспоживання насосів за кожну годину протягом року. При цьому враховується зміна рівня води у водозбірнику, комутації двигунів насосів апаратурою автоматизації.

Розглядається випадок використання фотоелектричних модулів SunPower SPR-P19-405-COM. Величина сонячної інсоляції протягом року визначалася за даними Photovoltaic Geographical Information System. Моделювання генерації ФЕС здійснювалося з використанням програми System Advisor Model, зокрема фотоелектричні модулі були описані 5-параметричною моделлю, інвертор PVS-166-TL-POWER-MODULE-1-US (multi-string, 166 кВт) – моделлю Inverter CEC Database. Під час оброблення результатів імітаційного експерименту використовувалися статистичні критерії Колмогорова-Смирнова, Кохрена, Ст'юдента, Фішера. Оцінювання параметрів регресії здійснювалося з використанням метода найменших квадратів.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Живлення насосів головного водовідливу від ФЕС, генерація якої має нестабільний характер, вимагає або наявності накопичувача енергії при роботі в автономному режимі, або під'єднання до електромережі. Перший випадок потребує облаштування дороговартісного акумуляторного накопичувача. Варіант під'єднання до мережі є більш економічним, через що обирається для аналізу. Це визначає наявність двостороннього обміну енергією між системою електропостачання насосів, до складу якої входить ФЕС, та енергосистемою. Вартість електроенергії, що споживається з мережі, визначається ринковими цінами, а місячний надлишок, що віддається до мережі, – «зеленим» тарифом. Тому в якості параметра оптимізації встановленої потужності ФЕС обрано відносне значення річного сальдо по оплаті за електроенергію, в якості базової величини прийнята повна вартість електроенергії, що споживається за рік для відкачування води без урахування фотоелектричної генерації. Критерій оптимізації встановленої потужності ФЕС полягає у наближенні до нуля річного сальдо.

Для оцінювання значень параметрів математичної моделі, що визначає зв'язок між значеннями параметра оптимізації та встановленою потужністю фотоелектричної станції, проведено імітаційний експеримент. Гіпотеза про лінійний вид регресії визнана статистично необґрунтованою при

рівні значущості 0,05. За методом найменших квадратів знайдено оцінки коефіцієнтів параболічної залежності [7]. Для рівня розузгодження $\pm 0,01$ в.о. при межах потужностей [3,1235; 3,1861] МВт визначено межі [351; 358] для загальних кількостей ланок послідовно з'єднаних фотомодулів. При цьому кожна ланка включає 22 модуля. При середній кількості ланок 355, ФЕС оптимальної конфігурації для заданих умов включає 16 інверторів, що обладнані 21 ланкою модулів кожен, та одного інвертора з 19 ланками. Оптимальна встановлена потужність ФЕС дорівнює 3,1640 МВт.

Повна вартість електроенергії, що споживається водовідливом шахти «Білицька» за рік, оцінюється математичним сподіванням 289 тис. грн. при середньоквадратичному відхиленні 877 грн. За наявності ФЕС оптимальної конфігурації річне сальдо по оплаті оцінюється середньою величиною 1139 грн. при стандартному відхиленні 674 грн.

IV. ВИСНОВКИ ТА НАПЯМОК ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Встановлена можливість вираження параболічною регресією залежності річного сальдо вартості електроенергії для роботи головного водовідливу шахти від встановленої потужності фотоелектричної станції. Незначна ширина довірчих інтервалів, яка не перевищує 1 %, та інтервалів прогнозування (1,5 %) дозволяють оптимізувати конфігурацію станції безпосередньо за лінійною регресією. Дослідження функціонування системи електропостачання оптимальної конфігурації підтвердили наявність значущого економічного ефекту від впровадження фотоелектричної генерації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Кабінет Міністрів України. (2021, вересень 22). Концепція Державної цільової програми справедливої трансформації вугільних регіонів України на період до 2030 року. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1024-2021-%D0%BF#n11>
- [2] E. Janson, G. Gzyl, and D. Banks, "The occurrence and quality of mine water in the Upper Silesian Coal Basin, Poland," *Mine Water and the Environment*, vol. 28, 2009, pp. 232–244. <https://doi.org/10.1007/s10230-009-0079-3>
- [3] Разумний Ю. Т., Рухлова Н. Ю., Рухлов А. В. Энергоэффективная работа водоводливной установки вугільної шахти. Науковий вісник Національного гірничого університету. Вип. 2. 2015. pp. 74–79. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2015_2_13
- [4] T. Morstyn, M. Chilcott, and M. D. McCulloch, "Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts," *Applied Energy*, vol. 239, 2019, pp. 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.226>
- [5] C. Saigustia, and S. Robak, "Review of potential energy storage in abandoned mines in Poland," *Energies*, vol. 14(19), 2021, pp. 1–17. <https://doi.org/10.3390/en14196272>
- [6] K. Trapani, and D. L. Millara, "Floating photovoltaic arrays to power the mining industry: a case study for the McFaulds lake (Ring of Fire)," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 35(3), 2016, pp. 898–905. <https://doi.org/10.1002/ep.12275>
- [7] S. Vasylets, K. Vasylets, "Determining optimal rated power of a photovoltaic station for mine dewatering," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6(8(120)), 2022, pp. 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267034>

Роль та перспективи впровадження розумної енергосистеми Smart Grid в сучасному світі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.087>

Назарій Чубай

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
Chubai_ak19@nuwm.edu.ua

Ірина Аврука

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
a.s.avruka@nuwm.edu.ua

Анотація—Робота присвячена обговоренню переваг впровадження розумних енергосистем у світі та їхнього впливу на зменшення викидів парникових газів. До прикладу наведено країни, які успішно впроваджують такі енергосистеми та досягли значного зменшення викидів діоксиду вуглецю. У роботі висвітлено різні аспекти розумних енергосистем, включаючи їхню ефективність, екологічність та економічну доцільність. Особлива увага приділена критичній потребі України у впровадженні таких систем для підйому енергетики.

Ключові слова—Smart Grid; відновлювальні джерела; парникові гази; енергосистема; автоматизація.

I. ВСТУП

Сучасне суспільство стає все більш енергозалежним та вимагає безперервного, надійного та стабільного живлення електроенергією. Також виникає необхідність розробки нових способів використання відновлюваної енергії для зменшення негативного впливу енергоспоживання на навколишнє середовище, оскільки енергетичний сектор на сьогодні відповідає за майже половину викидів парникових газів. Пошук балансу між цілями зменшення викидів, економічною ефективністю і стійкістю є основним завданням у дослідженнях розумних мереж та інтелектуальних енергетичних систем [1].

У даній роботі розглядається сучасний стан енергетичних систем та потреби впровадження розумних енергосистем (Smart Grid), також виконується оцінка переваг та можливостей розумної енергосистеми для підвищення енергоефективності та стабільності постачання електроенергії. Разом з цим розглянемо деякі технологічні аспекти впровадження таких систем та перспективи їхнього розвитку в Україні.

Система інтелектуального енергопостачання (або Smart Grid) - це електрична мережа, яка охоплює різноманітні заходи для оптимізації та збереження енергії [2]. Ці заходи охоплюють використання розумних лічильників, залучення інтелектуальних споживачів, використання відновлюваних джерел енергії та ресурсів. Електронне управління параметрами електроенергії, регулювання її виробництвом та

розподілом є важливими аспектами інтелектуальної енергосистеми.

Термін "Smart Grid" був вперше введений у 2003 році, коли співробітники Electric Power Research Institute висунули ідею заміни традиційних електромеханічних пристроїв енергосистеми більш оперативними системами електронного управління. У 2007 році в Сполучених Штатах було офіційно визначено поняття "розумна мережа" у законі "Про енергетичну незалежність та безпеку". Сьогодні найбільш масштабні програми Smart Grid реалізуються в США, Канаді та країнах Європейського Союзу. Крім цього, розглядається впровадження подібних проєктів у великих країнах, що розвиваються, таких як Індія, Бразилія і Мексика. До 2020 року планується досягти 100% охоплення смартлічильниками в США, Китаї, Бразилії та Японії [3].

II. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ПОТРЕБИ ВПРОВАДЖЕННЯ SMART GRID

A. Тенденції зростання кількості парникових газів у світі

Споживання енергії продовжує зростати внаслідок індустріального розвитку, демографічних змін та зростання кількості електричних пристроїв, які широко використовуються нами практично у всіх сферах нашого життя. Це призводить до збільшення навантаження на електромережі та потреби в їх розширенні та модернізації. Разом з цим зростає важливість відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячна та вітрова енергія. На сьогодні Німеччина є однією з лідерів у використанні ВДЕ. У 2020 році понад 50% виробництва електроенергії в країні було здійснено за допомогою цих джерел [4].

Зменшення енерговитрат стає актуальною метою для зменшення викидів діоксиду вуглецю (CO₂) та підвищення стійкості енергетичних систем. Глобальні викиди парникових газів збільшилися приблизно на 70% з 1970 року до 2018 року і продовжують зростати навіть сьогодні, попри значні зусилля, зроблені в останні роки для їх зменшення [5]. Це переважно пов'язано зі зростанням попиту на енергію в галузях транспорту, промисловості, будівництва та серед домогосподарств у країнах, таких як Китай і Індія.

В. Боротьба з негативним впливом кліматичних та інших факторів у сфері енергосистем

Збільшення надійності та стійкості енергетичних систем стає важливим завданням перед наростаючими загрозами, такими як природні катастрофи та кібератаки. У грудні 2015 та грудні 2016 року Україна стала жертвою двох масштабних кібератак на свою енергетичну систему [6]. Вимкнення електропостачання залишило без світла тисячі людей. У той час влада та енергетичні компанії України спільно з кібербезпековими експертами працювали над відновленням систем та ідентифікацією джерела кібератак. Цей процес був складним та часомірним, оскільки вимагав перевірки всіх аспектів інфраструктури та виправлення вразливостей. Розумні енергосистеми можуть бути більш стійкими та легше відновлюватися в подібних ситуаціях.

С. Роль штучного інтелекту у впровадженні розумних енергосистем

Впровадження цифрових технологій, таких як штучний інтелект дозволяє створювати розумні енергосистеми, які автоматизують процеси моніторингу, аналізу та керування енергетичними мережами. Німеччина активно розробляє та впроваджує концепцію "Енергетичної хмари" (Energiewende), що передбачає інтеграцію великої кількості відновлюваних джерел енергії та підвищення енергоефективності [7]. Штучний інтелект грає ключову роль у керуванні цією системою. Розумні енергосистеми залучають споживачів у процес управління енергією, дозволяючи їм активно впливати на своє споживання та брати участь у програмах зниження споживання в пікові часи.

III. ПЕРЕВАГИ ТА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ SMART GRID

А. Розв'язання питань розподілу та навантаження під час споживання енергії

Застосування Smart Grid, володіє численними перевагами та можливостями для вирішення багатьох завдань, пов'язаних з енергопостачанням. Система Smart Grid дозволяє ефективніше розподіляти та керувати навантаженням, визначаючи часи пікового та не пікового споживання енергії. Це дозволяє споживачам знижувати споживання в пікові години та використовувати електроенергію за більш вигідними тарифами в інші періоди. Для цього кожен дім або підприємство, повинно бути обладнане смартлічильниками, які можуть вимірювати споживану енергію в режимі реального часу та передавати ці дані на центральний сервер енергопостачальної компанії. Центральний сервер отримуватиме дані від смартлічильників і аналізуватиме їх. На основі аналізу встановлюватимуться різні тарифи на електроенергію для різних періодів доби. Завдяки смартметрикам та сповіщенням споживачі можуть бачити ціни на електроенергію в режимі реального часу і приймати рішення про споживання електроенергії відповідно до поточних тарифів. Споживачі зможуть активно використовувати

електроприлади в години зі зниженими тарифами, щоб зекономити кошти [8].

В. Інтеграція відновлювальних джерел енергії

Smart grid допомагає інтегрувати ВДЕ. Система може автоматично адаптуватися до змін у виробництві з використанням цих джерел, оптимізуючи їхню інтеграцію в мережу та забезпечуючи стійке енергопостачання. Smart Grid може автоматично регулювати роботу сонячних панелей і вітряків, змінюючи їхню потужність в режимі реального часу на основі прогнозованого виробництва та потреби в електроенергії. Наприклад, коли сонце сяє яскраво або вітер сильно дме, генератори можуть працювати на повну потужність. У нічний час або в безвітряні дні вони можуть знижувати виробництво. Smart Grid також враховує інші джерела енергії, такі як традиційні електростанції та батареї для зберігання енергії. Якщо виробництво відновлюваними джерелами спадає або зростає швидко, система може використовувати інші джерела, щоб забезпечити стійке енергопостачання [1; 8].

С. Підвищення безпекового рівня у використанні енергії за допомогою Smart Grid

Виявлення та ізоляція несправностей в мережі здійснюється швидше і ефективніше за допомогою Smart Grid, що скорочує час відключення та підвищує надійність електропостачання. У випадку раптової несправності на електромережі, смартлічильники та смартсенсори надсилатимуть дані про стан мережі на центральний сервер Smart Grid в реальному часі [1, 2]. Центральний сервер аналізує ці дані, виявляє відхилення від норми і розпізнає місце, де сталася несправність. Система може автоматично ізолювати ділянку мережі, де сталася несправність, за допомогою вимикання відповідних вимикачів або переадресації електропостачання. Після ізоляції несправної ділянки система може автоматично увімкнути резервні джерела енергії, такі як дизельні генератори або батареї для зберігання енергії, для забезпечення електропостачання інших користувачів. Оператори енергопостачальної компанії отримують автоматичні сповіщення про несправності та місце проблеми. Вони можуть відразу реагувати та виправити ситуацію шляхом направлення бригади для ремонту.

IV. ВПЛИВ SMART GRID НА ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ

Під час Двадцять сьомої Конференції сторін Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (COP27) був представлений новий звіт Організації Об'єднаних Націй, який підтверджує, що країни зменшили обсяг глобальних викидів парникових газів. Проте цей звіт також вказує на очевидну недостатність цих зусиль, щоб обмежити підвищення глобальної середньої температури до 1,5°C до кінця цього століття [9]. Велика кількість викидів діоксиду вуглецю (CO₂) в атмосферу спричинює зміну клімату. Ці викиди становлять загрозу нашому життю та безпеці, а також майбутнім поколінням. Це було затверджено національними урядами та міжнародними

органами, наприклад, під час кліматичної конференції COP21 у Парижі. Там були прийняті зобов'язання щодо значного зменшення викидів [10].

У зв'язку зі зростаючими обтяжливими проблемами, пов'язаними зі зміною клімату та підвищенням рівня парникових газів у атмосфері, розробка та впровадження систем Smart Grids стає необхідною. Парникові гази є основними факторами, які призводять до глобального потепління та кліматичних змін. Інтеграція відновлюваних джерел та ефективне керування навантаженням допомагають зменшити викиди парникових газів. Європейський Союз встановив амбіційні цілі щодо ВДЕ. Країни-члени інвестують у створення електростанцій, які виробляють електроенергію з цих джерел. Споживачі можуть використовувати енергетичні системи зберігання, такі як літій-іонні батареї, для зберігання енергії з ВДЕ. За допомогою смартметрів та мобільних додатків споживачі можуть отримувати інформацію про те, коли електроенергія виробляється з відновлюваних джерел. Це допомагає зменшити споживання енергії з традиційних джерел, використання яких зумовлює забруднення навколишнього середовища. Завдяки інтеграції ВДЕ та ефективному керуванню, Європейський Союз досягає значних зменшень викидів парникових газів. Це сприяє досягненню цілей щодо зміни клімату та зростання сталості в енергетичному секторі [11].

V. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РОЗУМНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ ТА ЇХ ВПЛИВ НА МАЙБУТНЄ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ

A. Розв'язання питань розподілу та навантаження під час споживання енергії

В Україні робота над впровадженням сучасних технологій в енергосистему розпочалася нещодавно. Починаючи з 2014 року, бельгійська компанія Tractebel активно працює над розробкою та впровадженням пілотних технологій та проєктів Smart Grid на рівні системного оператора - Національної енергетичної компанії "Укренерго". Це вказує на зростаючий інтерес та зусилля України у впровадженні новітніх рішень у сфері енергетики. Оператори системи розподілу електроенергії також активно працюють над впровадженням елементів Smart Grid. Ці кроки допоможуть Україні стати більш сталою та ефективною у сфері енергетики, сприяючи зменшенню витрат та покращенню надійності електропостачання [12].

Компанія ДТЕК демонструє високу активність у впровадженні сучасних технологій у сфері електроенергетики. Зазначається, що вона активно встановлює смартлічильники та автоматизує систему електропостачання, використовуючи сучасне програмне забезпечення. За допомогою розумних лічильників і автоматизації системи, ДТЕК отримує можливість зібрати та аналізувати дані про стан електромережі в режимі реального часу. Це дозволяє компанії більш ефективно контролювати стан енергосистеми та реагувати на будь-які негаразди чи аварії набагато швидше, що

сприяє підвищенню надійності та якості електропостачання для споживачів [12].

Генеральний директор АО "Хмельницькобленерго" Олег Козачук та технічний директор Руслан Слободян наголошують про необхідність негайного впровадження Smart Grid в Україні. Хоча енергетика не є піонером у цьому напрямку, вона, очевидно, намагається наздогнати світ у цьому процесі. Світ вже активно використовує Internet of Things (IoT, Інтернет Речей). У світі, де автоматизація та інтелектуалізація проникають у всі сфери життя, традиційному "ручному управлінню" не залишається місця.

Електричні мережі в Україні були побудовані ще в часи СРСР і використовують застарілі методи "ручного управління". Вони контролюються диспетчерами, більшість перемикачів виконується вручну оперативним персоналом. Це має негативний вплив на показник SAIDI (тривалість перерв в електропостачанні), який для всієї України у 2019 році становив 478 хвилин для планових відключень та 683 хвилини для непланових. У сільській місцевості індекс SAIDI часто перевищує 1000 хвилин. Для порівняння, індекс SAIDI в країнах Європейського Союзу у 2019 році склав 160 хвилин для планових відключень і 102 хвилини для непланових. Серед найкращих світових прикладів можна вказати Південну Корею, де індекс SAIDI становить лише приблизно 9 хвилин.

Наразі Українська енергетична система має низький рівень автоматизації. Особливо ця проблема виражена в сільській місцевості. В Україні існують села, які живляться від ліній 10 кВ, що відходять від підстанцій 35/10 кВ і не мають чергового персоналу. Ці лінії не телемеханізовані та можуть мати дуже велику довжину (до 30-40 км). У випадку аварійного вимкнення цих ліній, споживачі повинні повідомляти оператору системи розподілу (ОСР), який відправляє бригаду електромонтерів для виявлення та виправлення проблеми. Цей процес може займати багато годин і навіть понад 10 годин. Для розв'язання цих проблем потрібна комплексна стратегія, нова технічна політика та інвестиції у модернізацію електромереж та впровадження сучасних технологій.

Ще однією важливою причиною, яка спонукає електроенергетику до необхідних змін, є кардинальна зміна характеру виробництва та споживання електроенергії. Протягом багатьох десятиліть електроенергія вироблялася на великих електростанціях, передавалася через високовольтні лінії електропередачі та розподілялася серед споживачів. Ця система була побудована як "односміркований" потік електроенергії. Проте зараз замість централізованої генерації електроенергії з'явилася розподілена генерація. Сонячні, вітрові, біогазові електростанції з'єднуються з електромережею у точках, де це раніше було неможливим. Щобільше, багато споживачів електроенергії тепер мають власні генерувальні установки. Управління такою розподіленою мережею вручну стає надзвичайно складним завданням, а в майбутньому може стати навіть неможливим [13].

В. Впровадження розумних енергосистем в Україні

Застосування технологій Smart Grid в Україні, є важливим рішенням для розв'язання хронічних проблем у сфері енергетики. Міністерство енергетики працює над створенням Концепції впровадження Smart Grid і багато нормативних документів буде змінено, щоб полегшити широке впровадження таких технологій. Основною метою впровадження "розумних мереж" є створення "енергоінформаційної мережі." Основні компоненти цих технологій включають:

- Автоматизацію підстанцій 35 кВ і вище, трансформаторних підстанцій і розподільчих пунктів 6-20 кВ, а також насичення розподільчих електромереж реклоузерами.
- Впровадження автоматизованих систем моніторингу і управління електромережами з використанням програмного забезпечення.
- Розробка сучасних диспетчерських центрів та їх укрупнення.
- Геоінформаційні системи є необхідними для всіх елементів електромереж, оскільки вони надають чіткі географічні координати. Ця складова є критичною для державних органів, суміжних секторів та галузей.
- Впровадження системи інтелектуального обліку електроенергії. Старі лічильники не підтримують дистанційний збір показників. Більшість з них також не може передавати дані онлайн, включаючи інформацію про навантаження та якість електроенергії.
- Інтеграція відновлюваних джерел електроенергії, що дозволить забезпечити режими роботи, виконувати команди операційної безпеки і забезпечувати функціонування допоміжних послуг.
- Застосування систем накопичувачів електроенергії. Такий підхід є перспективним, оскільки це дозволить регулювати баланс між генерацією та споживанням.
- Розвиток каналів зв'язку та IT-інфраструктури є рішенням питання кібербезпеки для захисту мереж від несанкціонованого доступу.

VI. ВИСНОВКИ

Загалом розумна енергосистема Smart Grid є ключовим інноваційним напрямком в розвитку енергетики сучасного світу. Ця технологія має низку важливих переваг, а також виявляється надзвичайно актуальною для України. Впровадження Smart Grid сприяє зменшенню шкідливих викидів завдяки оптимізації виробництва та розподілу електроенергії. Це допомагає знизити негативний вплив на клімат та довкілля, сприяючи збереженню природних ресурсів та біорізноманітності. Розумна енергосистема забезпечує стабільність та надійність енергопостачання, зменшує втрати електроенергії та аварійні ситуації. Це особливо важливо в сучасному світі, де зростає залежність від

електроенергії у всіх сферах життя. Україна має унікальну можливість впровадження розумних енергосистем, оскільки це допоможе з розв'язанням проблеми старіння та неефективності наявних мереж, а також забезпечити енергетичну безпеку країни. Переходити до сучасних технологій у галузі енергетики стає необхідністю, Smart Grid відкривають шлях для цього.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Г. С. Белоха. Оптимізація техніко-економічних показників локальних систем електроживлення з транзактивним керуванням. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.
- [2] С.П. Денисюк, Р. Стшелецькі. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. Vol. 3. С. 7–22.
- [3] M.T. Burr. *Reliability demands drive automation investments. Public Utilities Fortnightly*. [Online]. URL: <https://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor>. (Accessed: October 15, 2023).
- [4] "Nature and environment: Renewables make up half of Germany's power mix." [Online]. URL: https://www.dw.com/en/renewables-make-up-over-half-of-germanys-power-mix/a-52986924?maca=en-VAM_volltext_ecowatch-28485-html-copypaste. (Accessed: October 15, 2023).
- [5] Питання та відповіді щодо майбутньої кліматичної угоди та позиції України на міжнародних переговорах. [Online]. URL: https://ucn.org.ua/?page_id=460. (Accessed: October 15, 2023).
- [6] Я. Пшетачник, С. Тарпова, *Візна Росії проти України: хронологія кібератак*. [Online]. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733549/EPRS_BRI\(2022\)733549_XL.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733549/EPRS_BRI(2022)733549_XL.pdf). (Accessed: October 15, 2023).
- [7] Німецька енергетична трансформація. [Online]. URL: <https://ua.boell.org/uk/2013/12/10/nimecka-energetichna-transformaciya-ekologiya-ta-energetika>. (Accessed: October 15, 2023).
- [8] Н.А. Хазанович, *Дослідження методів проектування малих електроенергетичних систем на базі концепції Smart Grid*. [Online]. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/6eb50360-b814-4b4c-a2ab-ec3173c2f2f3/content>. (Accessed: October 15, 2023).
- [9] "COP27: Delivering for people and the planet." [Online]. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/cop27>. (Accessed: October 15, 2023).
- [10] П'ять запитань про кліматичну конференцію ООН у Парижі. [Online]. URL: <https://www.dw.com/uk/пять-запитань-про-кліматичну-конференцію-оон-у-парижі/a-18884181>. (Accessed: October 15, 2023).
- [11] Зелений Курс (European Green Deal).(Згідно Представництва України при Європейському Союзу)." [Online]. URL: <https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/posolstvo/galuzeve-spivrobitnictvo/klimat-yevropejska-zelena-ugoda>. (Accessed: October 15, 2023).
- [12] Трофименко О. О. Механізми інтелектуального управління суб'єктами інноваційної діяльності у процесі впровадження енергетичних інновацій. *Концептуальні шляхи розвитку науки та освіти* : матеріали III міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 29–30.04.2021 р.). Львів, 2021. С. 19–21. 10 шагав к Smart Grid в Украине - мнение от Хмельницкоблэнерго. [Online]. URL: <http://reform.energy/analitics/10-shagov-k-smart-grid-v-ukraine-mnenie-ot-khmelnitskoblenergo-15217>. (Accessed: October 15, 2023).



КІБЕРНЕТИЧНА ТА ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКИ

Criteria of reliability of computer networks and assessment quality of service

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.088>

Besik Beridze

Department of Computer Engineering (Doctoral Study)
Georgian Technical University
Tbilisi, Georgia
b.beridze@bsu.edu.ge

Ibraim Didmanidze

Department of Languages and Information Technologies
Batumi Shota Rustaveli State University
Batumi, Georgia
ibraim.didmanidze@bsu.edu.ge

Mikheil Donadze

Department of Computer Sciences
Batumi Shota Rustaveli State University
Batumi, Georgia
mikheil.donadze@bsu.edu.ge

Vladimir Zaslavsky

Taras Shevchenko National University of Kyiv
Kyiv, Ukraine
zas@unicyb.kiev.ua

Abstract—A modern computer network counts tens of millions of servers and hundreds of millions of workstations. Network technologies have found widespread use in industry and business, so network reliability has become one of the most pressing problems.

In general, the reliability of all systems is determined by the reliability of their constituent elements. Different elements have different reliability. In many cases, reliability and reliability distributions are determined empirically.

If we define the reliability of the system as the possibility of communication between different nodes and workstations, then the reliability of the Internet turns out to be equal to the whole. Unless your workstation is among thousands of nodes, you cannot guarantee the absolute reliability of the network, so it is clear that both definitions are completely unacceptable.

The selection of criteria for determining the reliability and performance of information computer networks is one of the main problems of information systems.

Keywords—computer networks, effective performance criteria, network reliability.

I. INTRODUCTION

Today, the organization of information systems security regimes is a critically important strategic factor in the development of any foreign or local company. At the same time, as a rule, the main attention is paid to the requirements and recommendations of the relevant regulatory and methodological framework in the field of information protection. At the same time, many leading companies today, in order to maintain business continuity, use additional initiatives aimed at the sustainability and stability of corporate information systems.

In the process of organizing network resource protection, the concept of a systematic approach is often found in information sources. The concept of systematicity is not only the creation of appropriate protection mechanisms, it is a regular process that is carried out at all stages of the life cycle of an information system. At the same time, all means, methods and measures used to protect information are

combined into a single, complete mechanism - the protection system. Unfortunately, the need for a systematic approach to information technology security issues has not yet found proper understanding among users of modern information systems [1].

II. DETERMINE THE DEGREE OF NETWORK RELIABILITY

The degree of reliability of a computer network is either a defined, random event probability or a random variation of expected values. This depends on the network structure, bandwidth, associated E members of the network graph, and corresponding event probabilities.

Performance quality evaluates network reliability based on various network performance criteria. As a result of the study, several performance criteria were considered. For example, networks use time-to-order delays (RTTs) for packet-switched packets. Such criteria can be considered random variables, so that they do not depend on the set of working nodes of the graph.

In order to determine the reliability criteria of computer networks and, accordingly, to increase the efficiency of local and global networks, it is desirable to solve the following tasks:

1. Establish criteria for effective network operation. Performance and reliability appear as such criteria in many cases. Which in turn need to select specific qualitative indicators. For example, such as reaction time and readiness ratio.
2. Determine the number of variable parameters. (plurality). Which directly or indirectly affect the performance criteria. All such parameters can be grouped in different ways. For example, parameters of a specific protocol (the maximum frame size of the Ethernet protocol or the frame size of unconfirmed packets in the TCP protocol) or device settings. (Addressing table size or bogie filtering speed, router's internal salt bandwidth).

3. Determine the sensitivity limit for the values of the efficiency criterion.

The network performance can be evaluated logically from "working" - "not working", then the optimization proceeds to diagnose the damage in the network, so that the network can accept any working state.

Another form of evaluation is fine tuning of the network, where the characteristic parameters of the working network are changed to increase the performance of the network by at least a few percent. As a rule, network optimization can be imagined as a kind of transitional option, during the selection of which it is necessary to find such a value for the parameters that will significantly improve the performance indicators. For example, a request to a server (without data) should take 3 seconds instead of 10 seconds, and a file transfer to a remote computer should take 2 minutes instead of 2 minutes. But 30 seconds. In this way, we can choose 3 different forms of optimization tasks:

1. Bring the network to working condition. It involves searching for corrupted elements in the network. Wires, addresses, adapters, computers, device and software compatibility is checked here. Selection of correct values for the main parameters, which ensure message delivery to all nodes of the network, stacking of frame types and protocols, etc.
2. Coarse configuration – configuration of parameters that dramatically affect network characteristics. If the network is functional, but the data exchange is very slow, i.e. the delay is tens of seconds or minutes, or the connection between each other is often interrupted for an unknown reason, such a network can be called conditionally functional. It requires rough stacking. At this stage, it is necessary to find the reason for the delay in packets moving in the network.
3. Failure of one of the network elements or incorrect parameter setting is considered to be the cause of serious latency or variable network performance. If the network is large, it takes a long time to eliminate it, because the number of possible options is quite large. During normal network (busy) operation, the server's reaction to the user's request should not exceed 5 seconds.
4. Accurate setting of network parameters (optimization). If the network is working satisfactorily, then its performance and reliability cannot be improved by changing any parameter alone. In this case, in order to improve the quality of the network, it is necessary to find a successful agreement of its characteristics with various parameters.

It is not possible to achieve an optimal agreement between the parameters during detailed network stacking (in a pure mathematical sense), nor is it necessary to spend colossal efforts to achieve strict optimization, it is enough to find an agreement close to the optimal one, and the task of network optimization can be considered solved [1; 4; 9].

Such decisions are called rational options, and in practice, finding this decision is the main condition for network administrators.

Network fault detection is a trade-off between the two tasks of analysis (measurement, diagnosis, and localization of faults) and synthesis (deciding what changes need to be made to eliminate the fault).

Analysis – determining the value of the efficiency criterion. During the given agreement of the system parameters. At this stage, a monitoring sub-stage is allocated, which represents the procedure of collecting the primary data of network operation. Such data can be considered the statistics of various protocols and the number of frames circulating in the network. Port status of switches, routers and switches. The next step in analysis is the comparison of the data obtained as a result of monitoring with the previously obtained data. The task of analysis requires the active participation of a person, his highly intelligent data, as well as the use of such complex tools as expert systems, which are compiled as a result of the practical experience of network specialists.

Synthesis – choosing values for variable parameters in a network under the condition that efficiency is the best. If a threshold value is given as an indicator of efficiency, then the synthesis result should be a network variant that exceeds the given threshold. Bringing the network to a normal state is also one of the synthesis options. Often, the choice of device or model type is not technical in nature. It is determined either by commercial or general network development policies, so in some cases it is impossible to formulate an optimization task.

Effective network performance criteria are divided into two groups. They characterize network performance and reliability. Performance, in turn, is measured by two types of indicators, time – the time delay of data exchange in the network, or the duration of the delay, and the bandwidth indicator, which determines the amount of information in a unit of time. These two indicators are interdependent, so if we know one, the other can be calculated.

An important parameter of a computer network is its reliability, its ability to function correctly for a long period of time. This feature includes three components: reliability, availability and convenient service. Reliability enhancement is the detection of damage, fault and failure in the network, ensuring normal thermal regimes for electronic circuits. Reliability is measured by fault intensity and the average time spent on fault elimination. The readiness criterion is evaluated by the readiness coefficient, which is equal to the time the system is in working condition. It is calculated by the ratio of the time spent on the elimination of errors to the number of errors. If we consider the network as a transport system, then this problem can remain on any highway in the network, so in case of fallibility organization, all elements of the network through which this route will pass must be reserved. Transition from primary to reserved can be done both automatically and artificially. A high degree of network reliability can be achieved when performance testing procedures and failover elements are built into protocols. An example of this is the FDDI protocol, where physical connections

between network nodes and switches are always tested [2; 6].

As a result of the study of heterogeneous computer networks of different levels, it can be said that there are different grades of computer network fallibility, for example:

High availability – characterizes systems implemented with conventional computer technologies, where redundant hardware and software resources are used, and the system recovery time interval ranges from 2 to 20 minutes.

Fault-resistant – characterizes such systems, which have additional (reserve) equipment in reserve for all functional blocks. Recovery time does not exceed 1 second.

Continuous standby – a feature of such systems where system recovery takes place within 1 second. Such systems provide continuous functionality and performance regardless of network problems [12].

Performance and reliability characteristics are closely related. These two characteristics are mutually exclusive. An increase in one leads to a significant decrease in the other. This is explained by the fact that the delay and fallibility of the connection channels cause some packets to be distorted and lost, therefore communication protocols are forced to retransmit data, and because local networks are busy with data recovery at the transport and application levels, which time-out In the mode they work for tens of seconds, the performance of the network drops significantly in case of low reliability.

III. NETWORK SERVICE QUALITY ASSESSMENT

Based on the discussed criteria, modern corporate networks should meet certain strict requirements, one of the main requirements of which is to ensure its main function, i.e. to ensure the cooperation of computers and network devices connected to the network. All other requirements – performance, reliability, compatibility, manageability, security, extensibility and scalability – are related to the performance of the basic function. In network technologies, the term "quality of service" QoS (Quality of Service) was introduced, which includes only two main features - performance and reliability [1].

Two approaches have been adopted for assessing the quality of services. The first of these, from the user's point of view, implies that network service personnel guarantee certain quantitative indicators will be observed. For example, the packets sent by the subscriber of the network will be delayed for a time no more than 150 milliseconds, or the average bandwidth between the subscribers of the network A and B will be no less than 5 Mbit/s.

The second approach consists in the fact that the network will serve the subscribers according to their priorities, that is, only the given priority is guaranteed in the service. Such a service is called best effort. The network tries to serve subscribers with maximum quality, but does not make any guarantees. For example, local networks built on switches with frame priorities work according to this principle [1].

Performance – Network performance has several characteristics:

- Reaction time;
- Bandwidth;
- Transmission delay.

Reaction time – is defined as the time interval from

the moment of generating an order for any service of the network until receiving a response to it. Of course, it is clear that this time depends on the type of service, which user applies, and which service he applies. In addition, it also depends on the state of network elements - the load on network segments, routers and switches, server load, etc. From the user, these characteristics cause the reply "The network is working slowly today".

Network response time has many components. Their knowledge is not of interest to the user. Network specialists should analyze these times, calculate the productivity of network elements, identify bottlenecks and, if necessary, modernize the network.

Bandwidth - reflects the amount of data transmitted by the network or its parts in a unit of time.

Bandwidth characterizes the speed of performance of internal network operations - the transfer of data packets between network nodes and through communication devices. Thus, this is one of the main characteristics of a network. Network throughput is measured either by the number of bits transmitted per second or by the number of packets transmitted per second. Instantaneous, peak and average bandwidth can be measured for the network.

Instantaneous bandwidth is calculated by dividing the total volume of data transferred by the time spent, while taking a fairly large period of time - hours, days or weeks. Average bandwidth characterizes a network or its elements over a long period of time.

Instantaneous throughput differs from average throughput in that it takes a very small portion of time for analysis, e.g. 1 millisecond or 1 second.

Maximum throughput This is the maximum value of the instantaneous throughput during the observation period. Maximum bandwidth characterizes the network's ability to handle peak network loads.

Bandwidth can be measured between any two nodes in a network. In some cases, it may be useful to calculate the total network bandwidth, which is defined as the amount of data transmitted by all nodes in the network per unit of time. This feature characterizes the quality of the entire network, without dividing it into segments and devices.

Transmission delay – is defined for any node or element of the network and represents the delay from the appearance of a message at the input of a device or node to the appearance of the same message at its output. This parameter is essentially close to reaction time.

Network bandwidth and transmission delay time are independent parameters. A network may have high throughput, but its nodes may have long transmission delays. An example of such a situation is the

geostationary satellite communication channel. The bandwidth of such a connection channel is quite high - 2 Mbps, but the transmission delay time is also high - 0.24 s, which is caused by the long transmission distance (72,000 km).

Reliability and security – one of the main goals of creating distributed systems is to achieve higher reliability compared to the connection of individual computers in the network. It is important to distinguish several aspects of reliability. For technical devices, reliability indicators such as the average time of fault-free operation, the probability of faults, and the intensity of faults are used. These characteristics are useful for such simple elements and devices, which are characterized by only two states, working and non-working. In complex systems, the situation is more complicated. They are characterized by intermediate states, which cannot be taken into account by these characteristics. Therefore, for complex systems such as computer networks, other characteristics are used.

Readiness or availability coefficient – (availability) refers to the part of time during which the system can be used.

It is possible to increase readiness in systems by adding spare elements to them, so that in case of failure of one element, other elements ensure the functioning of the system.

For a system to be highly reliable, it must have a high availability rate. This is a necessary condition, but not sufficient. Data protection and consistency must also be ensured, that is, if the same data is stored on several servers in order to increase reliability, their identity must also be ensured.

An important feature in networks is also the probability of forwarding a packet without distortion to the addressee node. Along with this characteristic, other characteristics can be used: the probability of packet loss (for any reason), the probability of distortion of individual bits in the transmitted data, and the ratio of lost to transmitted packets.

To characterize the overall reliability of the system, security is also used, that is, the ability of systems to protect data from unauthorized access. This is more difficult to achieve in distributed systems than in centralized systems.

Another feature of the network is fault tolerance. In networks, falsification means the ability of the system to hide from users the fact of falsity of its individual elements, which the user may not even discover. Failure of any of their elements in fire-resistant systems leads only to a decrease in work quality, and not to a complete stop.

Extensibility and Scalability – The terms extensibility and scalability are sometimes used interchangeably in the literature, but this is incorrect. Both have a completely defined meaning.

Extension – (extensibility) refers to the network's ability to relatively easily add individual elements to the network, to complicate individual segments of the network, to replace existing equipment with more complex ones. Ease of expansion is often provided, but

within very limited limits. For example, in an Ethernet network built with a large coaxial cable, it is easy to add new subscribers, but their number should not exceed 30-40. However, up to 100 subscribers can be physically connected to the segment, but at this time the performance of the network deteriorates dramatically. The presence of such a limitation indicates poor scalability of the system under conditions of maximum expansion.

Scalability – refers to the ability of the network to increase the number of nodes in the network and the connection distances over a very wide range without degrading its performance. In order to ensure the scalability of the network, it is necessary to use additional communication devices and it is often necessary to change the structure of the network. E.g. A multi-segment hierarchical structure network built on the basis of routers and switches is characterized by good scalability. Several thousand computers can be included in such networks so that each user is guaranteed the required level of service.

Transparency – The transparency of the network is achieved when the network is not a set of interconnected computers, but a unified computing environment in the traditional sense. E.g. Sun Microsystems' famous slogan "The network is the computer" indicates the need for good network transparency.

Hardness can be achieved at two different levels - the user level and the program level. User-level persistence means that it will use the same commands and procedures to work with remote resources as it does with local resources. Transparency at the program level means that the application program needs the same calls and references to access a remote resource as it does with local resources. Difficulty is easier to achieve at the user level than at the software level.

Networks must cover the peculiarities of operating systems and different types of computers. The term hardship can be used in different aspects. Statelessness means that the user is not required to know the location of software or hardware resources. Portability means that resources should be freely moved from one computer to another without changing their names. The difficulty of parallelism lies in the fact that the parallelization of the computing process takes place automatically, without the intervention of the programmer.

It is difficult to say about modern networks that they are all poor. The difficulty is more about the goal, namely how networks should be developed.

Support of different types of traffic – one of the main purposes of computer networks is to allow users to access different computers' resources. Traffic generated in computer networks is characterized by its own characteristics and is significantly different from telephone or cable TV traffic. Since the 90s of the last century, the creation of computer data traffic, which combines sound and video images in digital format, began. Computer networks began to be used for video conferencing, chat and entertainment. It is clear that dynamic transmission of multimedia traffic requires other algorithms, rules and devices. Today, the share of multimedia data in computer data traffic is quite large. It

has already infiltrated global and local networks and is an integral part of them.

In general, the strictest requirement for dynamic voice and image traffic is their synchronicity. Even small delays will distort sound and images.

Computer data traffic is characterized by completely different features. There are no strict requirements for synchronicity here, it is not a difficulty. But combining these two types of traffic is already a much more difficult task. Today, serious work is being done on networks to solve this problem. Networks based on ATM technology are closest to this goal. This technology was originally designed for the simultaneous presence of different types of traffic in the network.

Manageability – it implies the possibility of centralized control of its main elements, detection and elimination of problems in the work process, analysis of network performance and planning of its development. Ideally, network management tools provide a means of monitoring, controlling, and managing network elements, while treating the network as a whole rather than as a collection of individual computers.

An effective network management system monitors the network and, when a problem is detected, takes some action, corrects the situation, and notifies the administrator of what happened and what actions to take. Along with this, the management system should collect data on the basis of which the development of the network should take place.

That the management system is very useful is clearly visible in a large network. In corporate and global networks, through a good management system, network management personnel can be reduced.

There is still much to be done in the network management system. Modern management systems only monitor the current processes in the network and cannot take active actions.

Compatibility - Integrability, means that the network can include various types of software and hardware, different operating systems and regulations, different stacks. A network consisting of various elements is called non-homogeneous or heterogeneous. And if the

heterogeneous network works without problems, it is called integrated [1; 10; 12].

CONCLUSION

The article discusses computer networks' functioning and reliability criteria and their determination methods. Network service quality assessment boundaries are presented. Because of the difficulty of direct calculations, many researchers are limited to only estimating confidence limits. In practice, the most productive computing systems are used, where it is possible to estimate the reliability of the network by limiting the number of network nodes. Modern approaches to the functioning of computer networks and the corresponding characteristics presented in the paper allow us to develop recommendations and criteria for the selection of network topology and structure, which will allow us to achieve higher reliability of computer networks.

REFERENCES

- [1] J. Beridze, T. Burkadze, and A. Burkadze. Management and Routing in Computer Networks. Tb., 2009.
- [2] A. Frangishvili, M. Kurdadze, and Z. Gasitashvili. Fundamentals of computer network engineering. Tb., 2009.
- [3] G. Murjiknel, A. Robitashvili, T. Vekua et al. Modern digital technologies of telecommunication. Tb., 2006.
- [4] O. Natroshvili. Data reception-transmission management and diagnostic algorithms in computer networks. GTU 2006.
- [5] O. Shonia, G. Janelidze, and B. Mefarishvili. Security of information and network resources GTU. Tb., 2009.
- [6] I. Gertsbakh, and Y. Shpungin. Network Reliability A Lecture Course. Springer, 2020.
- [7] J. F. Kurose, and K. Ross. Computer Networking A Top-Down Approach. 7th. ed. 2017.
- [8] S. K. Chaturvedi, Network Reliability: Measures and Evaluation, New York : John Wiley & Sons, 2016.
- [9] M. O. Ball, C. J. Colbourn and J. S. Provan. Network Reliability. *Handbook of Operations Research: Network Models*, Elsevier North-Holland. 1995. Vol. 7. Pp. 673–762.
- [10] V. Olifer. Computer Networks: Principles, Technologies and Protocols for Network Design. Wiley, 2006.
- [11] M. Whitman, and H. Mattord. Principles of Information Security. 5-th ed. 2014.
- [12] P. B. Khorev. Methods and means of protecting information in computer systems. Academy, 2005.

Approach to Evaluate Scheduling Strategies in Container Orchestration Systems

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.089>

Yevhenii Voievodin

Department of Information Technologies
Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy
Cherkasy, Ukraine
yevhenii.voievodin@vu.edu.ua

Inna Rozlomii

Department of Information Technologies
Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy
Cherkasy, Ukraine
inna-roz@ukr.net

Andrii Yarmilko

Department of Automated Systems Software
Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy
Cherkasy, Ukraine
a-ja@ukr.net

Abstract—This article offers an in-depth examination of scheduling strategies in container orchestration systems, emphasizing the importance of selecting the most suitable strategy for a system's specific needs. The article explores the evolution of container systems and challenges around cloud reliability and fault tolerance. A structured experimental methodology was introduced to compare different strategies systematically, utilizing various testing methods like packing until first rejection, packing until the cluster is full, and introducing different malfunctions such as liveness and network partitioning. Comparative results between the “binpack” and “spread” strategies highlighted that while the former excels in higher scheduling requests acceptance rate, the latter is superior in offering higher availability. The findings show the need for aligning the scheduling strategy with system objectives, be it resource optimization, fault tolerance or other desired characteristics.

Keywords—container orchestration system; Kubernetes; Docker; scheduling strategy; cluster resource utilization; availability; fault tolerance; resource allocation

I. INTRODUCTION

Container orchestration systems (COS) are essential tools in modern computing environments due to their central role in efficiently managing and coordinating containerized applications. A container image is a self-contained, immutable package that encapsulates an application's code, runtime, libraries, and dependencies, ensuring consistent deployment across various environments [1]. Containers, in turn, are lightweight, portable, and isolated instances created from container images, facilitating the efficient utilization of system resources and ensuring application isolation. While Docker stands as one of the most widely recognized technologies for containerization [2, 3], it is important to note that several alternative containerization solutions exist in the ecosystem.

One of the crucial parts of the COS is a scheduler. Its primary responsibility is to determine the optimal placement of containers within the cluster, which

consists of nodes. Nodes represent physical computing resources, encompassing attributes such as available random-access memory (RAM), capabilities of central processing unit (CPU), and storage capacity. The complexity of placement optimization is heightened by the dynamic nature of both container attributes and the fluctuating quantity of containers to be deployed within a cluster.

Among the commonly employed strategies are “binpack” and “spread” [4]. The “binpack” strategy aims to optimize resource usage by efficiently filling up a node with as many containers as possible before considering other nodes. This approach minimizes the initial use of cluster resources, as additional nodes are only brought into play once the initial set of nodes is fully utilized with containers. The “spread” strategy is designed to place containers on nodes with the greatest available physical resources, typically selecting the least occupied node within the cluster. This approach leads to the dispersion of containers throughout the cluster, enhancing the overall fault tolerance [5] and availability [6] of the deployed applications.

The presented strategies show which of the desirable qualities might be expected when the scheduling strategy is selected to be used by COS. It's worth noting that strategies can be more intricate than the ones outlined. For instance, a “spread” strategy could extend beyond selecting merely the least occupied node and instead aim to choose a node located on a distinct physical rack [7], further enhancing deployment resilience and fault tolerance.

The following two use-cases for COS shed light on application deployment patterns that must be taken into account when selecting a scheduling strategy, along with the key metrics to consider.

In the first use-case, an application is designed to allow users to execute custom-written code, such as an online integrated development environment (IDE) [8]. Containers prove advantageous in this context due to their inherent capacity to provide the requisite level of program isolation on individual nodes. Moreover,

services like online IDEs often necessitate support for various technology stacks, rendering containers a suitable choice. A scheduling strategy such as “binpack” may be deemed advantageous for optimizing resource allocation during these brief program evaluations.

In the second scenario, an online banking application employs a microservices architecture [9] consisting of 200 microservices, each assigned a specific level of importance. To enhance system robustness, the COS deploys multiple instances of identical containers for the more critical microservices, thereby improving overall system availability. Given the intricate network of interdependencies among microservices, the primary concern revolves around fault tolerance. In this context, where the online banking platform strives for heightened availability, a scheduling strategy like “spread” proves more effective.

II. RELATED WORKS

One of the first systems for large-scale cluster management was Google’s Borg. Borg provided tools for efficient, reliable management of applications in clusters. Burns et al. presented an insightful analysis of Borg, Omega, and Kubernetes, detailing lessons learned over a decade of container management at Google [10]. This work laid the foundation for Kubernetes, now a dominant COS in the field.

Comprehensive analysis of fault tolerance in the cloud computing [11] that was done by Deepak K. G. et al. shows the variety of faults and mechanisms to prevent them in the cloud, which a typical environment for the COS based systems. The paper also covers the metrics of fault tolerance, such as: reliability, availability, usability etc. Authors make conclusion that there are still challenges associated with building fault tolerant systems.

Machine learning techniques also have use-cases in the COS systems. Zhong Z. et al., describe idea behind using machine learning in scheduling algorithms [12] and provide comparison of different studies in the area of machine learning. Authors make conclusion that there is no systematic approach to build a complete machine learning-based optimization framework. Which implies the need to compare different machine-learning based algorithms effectively.

III. KEY PERFORMANCE INDICATORS FOR SCHEDULING EFFICIENCY

As previously discussed, the choice of scheduling strategy depends on aligning with specific attributes that hold significance for the COS-dependent system. The effectiveness of a scheduling strategy is contingent upon its ability to closely match these chosen attributes:

- Cluster resource utilization. This metric quantifies the efficient utilization of cluster resources. It can be measured as the ratio of used resources to the total resources available. Often likened to fragmentation [13], higher fragmentation levels are unfavorable as they constrain the scheduler’s options and result in underutilized resources.

- Container deployment density. The number of containers deployed within the cluster is a pivotal metric. Maximizing this number is desirable, particularly for services reliant on COS that prioritize serving a larger client base.
- Scheduling request satisfaction ratio. This metric offers insight into how effectively scheduling requests are fulfilled. It is calculated as the ratio of rejected scheduling requests to the total scheduling requests in the scheduler queue.
- Availability and fault tolerance. For systems with stringent availability requirements, such as online banking, high availability is paramount and closely linked to fault tolerance.

IV. EXPERIMENT FRAMEWORK FOR STRATEGY EVALUATION

The proposed methodology outlines a sequence of actions for collecting metrics and evaluating the efficiency of different strategies. An “experiment” represents a series of actions that are systematically applied to a particular cluster configuration and replicated across various strategies. The core objective of a concrete experiment is to determine which strategy best suits a given configuration, with all strategies following the same container sequence and cluster setup.

Experiment consists of multiple iterations. Within a single iteration of the experiment, the following phases unfold:

- Setup iteration phase. Prior to executing the iteration, cluster instances must be created for each tested strategy. Additionally, a stream of scheduler requests is prepared. This stream is essential for distributing identical requests to different clusters, allowing different strategies to schedule the same sequence of containers.
- Packing phase. During this phase, container instances are placed within the cluster until specific conditions are met. These conditions are contingent on the packer’s configuration, which will be detailed in subsequent sections.
- Packing results collection phase. After the packing phase is completed, various data points are collected, including metrics such as the overall resource utilization or the number of containers created. These data points are stored in a shared storage repository for subsequent analysis.
- Malfunction phase. If a malfunction is configured, it is introduced to the cluster where resources have been packed.
- Malfunction results collection phase. Similar to the collection of packing results, this phase focuses on specific aspects of availability or fault tolerance in the presence of malfunctions. The results are saved in the shared repository, which is accessible across iterations.

Finally, upon gathering the raw data points, the experiment proceeds to compute the desired metric

values. Due to the raw nature of these data points, there exists a multitude of approaches for deriving the final metrics. These may encompass calculations such as computing averages, determining minimum or maximum values, and assessing percentile values.

V. EFFICIENCY TESTING TECHNIQUES FOR SCHEDULING STRATEGIES

A. Halting at Scheduling Request Rejection

The decision of when to cease attempting to allocate containers to the cluster is primarily determined by the packing algorithm, which relies on values generated by the scheduler requests stream. The “until first rejection” packing strategy halts its efforts to assign containers to the cluster as soon as it encounters its initial scheduling request rejection, indicating an insufficient allocation of physical resources for a particular container within the given cluster.

Given that the packer is responsible for managing multiple strategies concurrently, the packing process halts for the specific strategy encountering the rejection while continuing for the others. This approach is instrumental in the experimental process, as it directs attention towards identifying a strategy capable of dynamically allocating resources in a manner that minimizes fragmentation and resource wastage, while aims to avoid schedule request rejections for as long as possible. In this particular context, the fundamental metrics for comparative analysis of strategies comprise the quantification of generated containers and the coefficient denoting resource utilization. Experimental iterations can be executed on clusters featuring distinct node sets.

B. Full Cluster Utilization

The core concept behind the “pack until the cluster is full” method is to prioritize maximum resource utilization by disregarding failures. It’s important to note that a cluster is deemed “full” when it lacks the physical resources necessary to accommodate a container configured with the most minimal requirements. The key idea is to stop packing phase after cluster cannot serve scheduling request with minimal possible requirements. Consequently, even with this approach, fragmentation may persist, as it hinges on the specific criteria defining those minimal requirements.

The primary metrics for evaluation encompass the count of containers successfully allocated to clusters, where a higher count indicates better performance, as well as the ratio of successful scheduling requests to the total number of requests. The strategy that excels is one that efficiently places a greater number of containers with a high success rate.

C. Liveness Malfunction

An application deployed within a container is considered available when it can execute its core functions without degradation. Liveness testing is designed to assess both the availability of applications and the fault tolerance characteristics of scheduling strategies. This is achieved by simulating real-world

hardware issues that occasionally occur in data centers, such as node or rack failures [14].

As previously mentioned, there are various deployment methods in COS. In some cases, a single application container is duplicated two or more times to ensure that if one instance experiences problems, the others can continue to perform the application’s core functions.

The algorithm for testing availability is relatively straightforward: specify a percentage of nodes to be deliberately taken offline, randomly select nodes within the cluster for removal, and then assess how many applications remain available. By repeating this process multiple times, as suggested by the experiment’s lifecycle, a comprehensive understanding of availability properties can be obtained.

D. Network Partition Malfunction

Certain applications, like the online banking microservice system used as an example previously, rely on network communication. In such cases, these applications become inaccessible if any of their direct or transient dependencies experience downtime. In this context, a direct dependency is one that an application container directly utilizes to fulfill specific functions, while a transitive dependency is one that the application container relies on indirectly through its direct dependencies.

The malfunction is engineered to disrupt network connections between specific nodes within clusters. After a predetermined number of connections are severed, the collector can calculate how many applications remain accessible. It’s important to note that an application is considered available if all of its dependencies are reachable within the isolated network partition [15]. Additionally, the container that directly depends on the container being assessed for connectivity must itself be accessible through a direct connection to a node, simulating a scenario akin to client-side load balancing, where the first container attempts to connect to one of the known nodes. The same principle applies to other dependencies of other containers.

VI. EXAMPLE OF STRATEGIES COMPARISON

In the first example, the “pack until full” packing algorithm is applied. Containers in this scenario specify only their RAM requirements in Gigabits (GiB). The stream generates random containers in the following sequence with associated probabilities: 1 GiB, 2 GiB, 3 GiB – 50%; 5 GiB, 6 GiB – 33%; 8 GiB, 16 GiB – 12%; 32 GiB – 5%. No malfunctions are introduced into this experiment. Two strategies are under evaluation: “binpack” and “spread”. The experiment is repeated ten times, each time with an increment of ten nodes in the cluster. Fig. 1 illustrates the containers creation create. The experiment result implies that “binpack” is preferable when aiming for a higher scheduler acceptance rate.

In the second example, the “pack until first rejection” algorithm is used. The stream configuration remains the same as in the previous example, except that

each container is deployed twice. Additionally, this experiment introduces malfunctions by killing 20% of random nodes. Fig. 2 illustrates the application survival rate (the percentage of applications that continue to function), which is notably higher, surpassing 10%, in favor of the “spread” strategy.

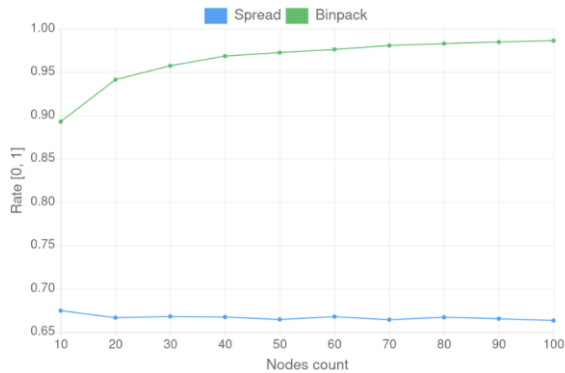


Figure 1. Containers creation rate chart

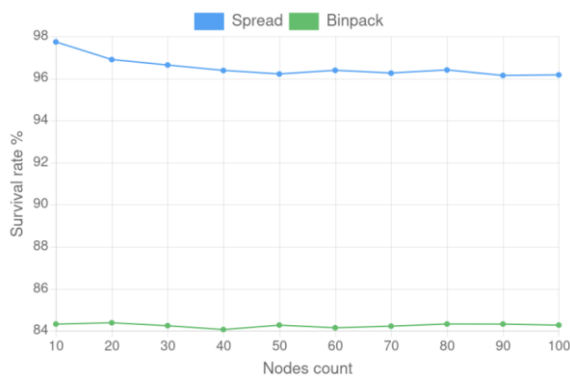


Figure 2. Applications survival rate chart

VII. DISCUSSIONS

The evolution and growth of COS have opened a new frontier for large-scale application deployment and management. While the introduced experimental framework is comprehensive, real-world scenarios may introduce complexities not captured in our controlled environment. For example, variable network latencies, hardware discrepancies, and unpredictable workloads could influence the effectiveness of a chosen strategy. The framework can be extended to include more performance indicators and testing methods. This includes integrating metrics that are specific to certain types of schedulers. For instance, there might be metrics unique to prediction-based algorithms. While this narrows the range of strategies being examined, it provides additional data to make more informative strategy selection decision. Sharing the findings with the broader community could lead to collaborative improvements and innovative solutions.

VIII. CONCLUSION

One of the central findings of this article is the critical importance of scheduling in COS systems. The efficiency of an application can be greatly impacted by

the chosen scheduling approach, with strategies like “binpack” and “spread” demonstrating that the optimal method varies based on context and workload.

Thorough testing, especially in scenarios that mimic network partitions and other malfunctions, is important. Such a testing framework exposes key characteristics of different strategies and helps to select the most suitable strategy for a specific application. Looking ahead, as applications continue to increase in complexity, the influence and utility of COS will only increase. Innovations, particularly those involving machine learning, could lead to a new era of COS schedulers.

This journey through COS scheduler has provided valuable insights. However, it’s essential to underline that this article represents just a fragment of the potential knowledge. Collaboration on a global scale will be the key to unlocking the next stages of advancement in container scheduling algorithms.

REFERENCES

- [1] A. Verma, L. Pedrosa, M. Korupolu, D. Oppenheimer, E. Tune, and J. Wilkes. Large-scale cluster management at Google with Borg. *Proceedings of the tenth european conference on computer systems*. 2015. Pp. 1-17.
- [2] C. Anderson. Docker [software engineering]. *Ieee Software*. 2015. Vol. 32(3). Pp. 102-c3.
- [3] A. Mouat. Using Docker: Developing and deploying software with containers. O'Reilly Media, Inc., 2015.
- [4] C. Cérin, T. Menouer, W. Saad, and W. B. Abdallah. A new docker swarm scheduling strategy. *2017 IEEE 7th international symposium on cloud and service computing (SC2), IEEE*, 2017. Ppp. 112-117.
- [5] P. Kumari, and P. Kaur, A survey of fault tolerance in cloud computing. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 2021. Vol. 33(10). Pp. 1159-1176.
- [6] M. Nabi, M. Toeroe, and F. Khendek. Availability in the cloud: State of the art. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016. Vol. 60. Pp. 54-67.
- [7] K. Senjab, S. Abbas, and N. Ahmed. A survey of Kubernetes scheduling algorithms. *Journal of Cloud Computing*. 2023. Vol. 12(1). Pp. 1-26.
- [8] S. Bartkova. Research of online IDE and analysis of directions of development. 2021 [Card-file ontu.edu.ua].
- [9] S. Newman. Building microservices. O'Reilly Media, Inc. 2021.
- [10] B. Burns, B. Grant, D. Oppenheimer, E. Brewer, and J. Wilkes. Borg, Omega, and Kubernetes: Lessons learned from three container-management systems over a decade. *Queue*. 2016. Vol. 14(1). Pp. 70-93.
- [11] D. K. Gaur, and A. Mahalkari. Comparative Analysis of Fault Tolerance Techniques in Cloud Computing. *International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT)*. 2020. Vol. 11(4). Pp. 59-64.
- [12] Z. Zhong, M. Xu, M. A. Rodriguez, C. Xu, and R. Buyya. Machine learning-based orchestration of containers: A taxonomy and future directions. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2022. Vol. 54(10s). Pp. 1-35.
- [13] A. Silberschatz, P. B. Galvin, and G. Gagne. Operating System Concepts. 10th. ed., John Wiley & Sons, Inc, 2018.
- [14] S. M. Ataallah, S. M. Nassar, and E. E. Hemayed. Fault tolerance in cloud computing-survey. *2015 11th International computer engineering conference (ICENCO), IEEE*, 2015. Pp. 241-245.
- [15] M. Kleppmann. Designing data-intensive applications: The big ideas behind reliable, scalable, and maintainable systems. O'Reilly Media, Inc., 2017.



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

Team Ukraine
support.ukr@science-at-risk.org
+49 173 2748344
+49 525 2022033



Наукове видання

**Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції
«Моделювання, керування та інформаційні технології»**

Друкується в авторській редакції

Відповідальний за випуск

Андрій Сафоник

Технічний редактор

Галина Сімчук

Комп'ютерна верстка

Наталія Жуковська

*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.*