

**МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ
КОНФЕРЕНЦІЙ ЧОРНОМОРСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ**
№ 2(1), 14 серія, 2026

**Матеріали XXIII Міжнародної наукової конференції
«ОЛЬВІЙСЬКИЙ ФОРУМ – 2026: стратегії країн
Причорноморського регіону в геополітичному просторі»**

29 червня – 04 липня 2026 р., м. Миколаїв, Україна

СЕРІЯ: ТЕХНІЧНІ НАУКИ

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

Заснований у 2025 році

Виходить 2 рази на рік



Миколаїв-2026

Засновано у 2025 році. Виходить 2 рази на рік.

Засновник і видавець:

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

РЕДАКЦІЙНА РАДА

Голова редакційної ради:

Леонід Клименко – доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, професор, в.о. ректора університету, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна).

Заступники голови:

Юрій Котляр – доктор історичних наук, професор, перший проректор, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Роман Дінжос – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Володимир Ємельянов – доктор наук з державного управління, заслужений діяч науки і техніки України, професор, директор Навчально-наукового інституту публічного управління та адміністрування, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна).

Члени редакційної ради:

Світлана Белінська – доктор економічних наук, професор, декан факультету економічних наук, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Ангела Бойко – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії, декан факультету комп'ютерних наук, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Віталій Вербицький – кандидат історичних наук, доцент, в.о. декана факультету фізичного виховання і спорту, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Олена Кузнецова – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри соціальної роботи, управління і педагогіки, в.о. директора Навчально-наукового медичного інституту, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Ганна Норд – доктор економічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту післядипломної освіти, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Дмитро Січко – кандидат юридичних наук, доцент, декан юридичного факультету, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Анастасія Хмель – кандидат історичних наук, доцент, декан факультету політичних наук, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна);

Людмила Шерстюк – кандидат педагогічних наук, доцент, в.о. декана факультету філології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна).

**Свідectво про реєстрацію
друкованого засобу
масової інформації:**
Серія, номер R30-05946
від 27.03.2025 року

**Конференція
зарєєстрована в
УкрІНТЕІ**
№535 від 24.06.2026 р.

*Рекомендовано до друку та
поширення мережею
рішенням Вченої ради ЧНУ
№ 7 від 29.06.2026 р.*

Мови видання:
українська, англійська,
мови ЄС

Електронна версія:
[//mspc.mk.ua](https://mspc.mk.ua)

Адреса редакції:
м. Миколаїв,
вул. 68 Десантників, 10,
54003
Тел.: 8 (0512) 76-55-99,
8 (0512) 76-55-81.
факс 50-00-69, 50-03-33
E-mail: rvv@chmnu.edu.ua

М 32 Матеріали науково-практичних конференцій Чорноморського національного університету імені Петра Могили. Серія: Технічні науки : Ольвійський форум – 2026 : стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі : XXIII міжнар. наук. конф. 29 черв. – 04 лип. 2026 р., м. Миколаїв : матеріали конф. / М-во освіти і науки України ; ЧНУ імені Петра Могили. – Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2026. – № 2 (1) , 14 серія – 148 с.

УДК 004+3+62+7/9]:001.891](477)(06)

**MATERIALS OF THE SCIENTIFIC
AND PRACTICAL CONFERENCE
OF PETRO MOHYLA BLACK SEA
NATIONAL UNIVERSITY**
№ 2(1), Series 14, 2026

**Materials of the XXIII International Scientific Conference
«Olbia Forum – 2026: strategies of the countries of the
Black Sea region in the geopolitical space»**

June 29 – July 04, 2026, Mykolaiv, Ukraine

SERIES: TECHNICAL SCIENCES

SCIENTIFIC COLLECTION

Founded in 2025

Published 2 times a year



Mykolaiv-2026

Founded in 2025. It is published 2 times a year.

Founder and publisher:

Petro Mohyla Black Sea National University

EDITORIAL COUNCIL

Chairman of the Editorial Board:

Leonid Klymenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Professor, Acting Rector of the University, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine).

Deputy Chairmen:

Yurii Kotliar – Doctor of History, Professor, First Vice-Rector, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Roman Dinzhos – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Volodymyr Yemelianov – Doctor of Science in Public Administration, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Professor, Director of the Educational and Research Institute of Public Administration and Management, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine).

Members of the Editorial Board:

Svitlana Belinska – Doctor of Economics, Professor, Dean of the Faculty of Economics, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Anzhela Boyko – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Dean of the Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Vitalii Verbytskyi – PhD in History, Associate Professor, Acting Dean of the Faculty of Physical Education and Sports, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Olena Kuznetsova – PhD in Pedagogy, Associate Professor of the Department of Social Work, Management and Pedagogy, Acting Director of the Educational and Research Medical Institute, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Hanna Nord – Doctor of Economics, Professor, Director of the Educational and Research Institute of Postgraduate Education, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Dmytro Sichko – PhD in Law, Associate Professor, Dean of the Faculty of Law, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Anastasiia Khmel – PhD in History, Associate Professor, Dean of the Faculty of Political Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine);

Liudmyla Sherstiuk – PhD in Pedagogy, Associate Professor, Acting Dean of the Faculty of Philology, Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine).

The conference is registered in
the catalog of international
conferences in Academic
Resource Index / Research Bib.



The conference is registered in
UkrNTI
№535 dated June 24, 2026.

**Identifier in the Register of
Subjects in the Media Sector:**
R30-05946 (Decision of the
National Council of Ukraine on
Television and Radio
Broadcasting No. 656 dated
March 27, 2025).

*Recommended for publication by
the decision of the Academic
Council of Petro Mohyla Black
Sea National University
(protocol № 7, 29.06.2026).*

Languages of the publication:
Ukrainian, English,
EU languages

Electronic version:
[//mspc.mk.ua](https://mspc.mk.ua)

Editorial address:
Mykolaiv,
10 Desantnykov St., 68, 54003
tel.: 8 (0512) 76-55-99,
8 (0512) 76-55-81.
fax: 50-00-69, 50-03-33
e-mail: rvv@chmnu.edu.ua

M 32 Materials of scientific and practical conferences of Petro Mohyla Black Sea National University. Series : Technical sciences : Olbia Forum – 2026 : strategies of the countries of the Black Sea region in the geopolitical space : XXIII int. scientific conf. June 29 – July 04, 2026, Mykolaiv : scientific col. / Ministry of Education and Science of Ukraine ; Petro Mohyla Black Sea National University. – Mykolaiv : Publishing house of Petro Mohyla Black Sea National University, 2026. – № 2 (1) Series 14 – 148 p.

UDC 004+3+62+7/9]:001.891](477)(06)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ
СЕРІЯ: ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Головний редактор:

Анжела Бойко кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри дизайну, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Заступники головного редактора:

Едуард Лисенков доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та математики, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Свген Давиденко кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Юрій Кондратенко доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Члени редакційної колегії:

Свген Сіденко кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Ірина Манькусь кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики та математики, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Альона Швед докторка технічних наук, професорка, професорка кафедри інженерії програмного забезпечення, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Інесса Кулаковська кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Микола Фісун доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Сергій Гузій кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики та математики, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

Відповідальний секретар:

Ігор Кандиба PhD, старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення, Чорноморський національний університет імені Петра Могили (м. Миколаїв, Україна)

EDITORIAL BOARD
SERIES: TECHNICAL SCIENCES

Editor-in-Chief:

Anzhela Boiko Candidate of technical sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Deputy editors-in-chief:

Eduard Lysenkov Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics and Mathematics, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Yevhen Davydenko Candidate of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Yurii Kondratenko Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Intelligent Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Members of the editorial board:

Yevhen Sidenko Candidate of technical sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Intelligent Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Iryna Mankus Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Mathematics, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Alona Shved Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Inessa Kulakovska Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Intelligent Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Mykola Fisun Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Serhii Huzii Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Physics and Mathematics, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

Executive Secretary:

Ihor Kandyba PhD, Senior Lecturer of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

ЗМІСТ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ	12
Катерина Антіпова АДВЕРСАРІАЛЬНІ АТАКИ НА ДЕТЕКТОРИ ЗГЕНЕРОВАНОГО ТЕКСТУ	13
Андрій Бень, Артур Соколов, Сергій Вороненко СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ОПТИМІЗАЦІЇ ВАНТАЖНОГО ПЛАНУ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ	16
Надія Болюбаш, Ольга Яслик СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЕТЕКЦІЇ, СЕГМЕНТАЦІЇ Й РОЗПІЗНАВАННЯ РУКОПИСНИХ ЦИФР В ОЦИФРОВАНИХ ДОКУМЕНТАХ СКЛАДНОЇ ФОРМИ	19
Надія Болюбаш KNOWLEDGE-BASED ПІДХІД ДО НАДАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ ІНВЕСТИЦІЙНИХ РІШЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТРАНСФОРМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ	24
Стефанія Бондаренко SELF-HEALING ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	29
Оксана Брагінець ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ГРАФІЧНОГО МЕТОДУ ТА МЕТОДУ ДИХОТОМІЇ ДЛЯ НЕЛІНІЙНИХ РІВНЯНЬ У MAPLE	33
Віктор Гожий ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ І ІНСТРУМЕНТИ ЦИФРОВОГО МАРКЕТИНГУ	38
Олександр Гожий, Ірина Калініна ДИСБАЛАНС КЛАСІВ В ЗАДАЧАХ МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	42
Валерій Димо ПОКРАЩЕННЯ СЕГМЕНТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ШЛЯХОМ УРАХУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	46
Ірина Калініна, Олександр Гожий ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА	50
Ігор Кандиба, Микола Фісун ЗАСТОСУВАННЯ МЕДІАРІРЕ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СКОНЦЕНТРОВАНОСТІ УВАГИ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ ПІД ЧАС ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ	55

Катерина Кірей ОПТИМІЗАЦІЯ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ СИСТЕМ АВТЕНТИФІКАЦІЇ В АРХІТЕКТУРАХ POINT-TO-POINT	59
Олександр Ковалів, Євген Сіденко, Галина Кондратенко КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ЕПІДЕМІЧНИХ РИЗИКІВ У НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ	63
Микита Колесніков АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ МУЗИЧНОГО КОНТЕНТУ, СТВОРЕНОГО З ВИКОРИСТАННЯМ ІНСТРУМЕНТІВ ШІ	66
Ілля Крикалов, Євген Давиденко ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РОЗКЛАДОМ ЗАНЯТЬ У ВЕБЗАСТОСУНКАХ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ	71
Інесса Кулаковська GREEDI ТА Δ-GREEDI: ЕФЕКТИВНІСТЬ ЖАДІБНИХ АЛГОРИТМІВ ПІД ДЕЛЬТА- МАТРОЇДНИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ	75
Олександр Мещанінов Е-УНІВЕРСИТЕТ ЯК СОЦІАЛЬНА МЕРЕЖА	79
Леонід Пелихівський, Андрій Бень, Сергій Вороненко МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕННЯ АВТОНОМНИХ НАДВОДНИХ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	82
Віктор Раленко, Євгеній Стоєв ВИКОРИСТАННЯ МІКРОФРОНТЕНДНОЇ АРХІТЕКТУРИ ПРИ СТВОРЕННІ МАСШТАБОВАНИХ КОРИСТУВАЦЬКИХ ІНТЕРФЕЙСІВ	85
Віктор Раленко, Марина Фаленкова ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВІ МЕХАНІЗМІВ УВАГИ ДЛЯ СЕМАНТИЧНОГО АНАЛІЗУ ТЕКСТУ	88
Максим Салютін, Юрій Кондратенко, Євген Сіденко INT8-КВАНТИЗОВАНІ МОДЕЛІ YOLO26 ДЛЯ МОБІЛЬНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ	91
Віктор Сенішин, Гліб Горбань АРХІТЕКТУРНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ СКАЛЬОВАНИХ СИСТЕМ ОБРОБКИ ВІДЕОКОНТЕНТУ НА БАЗІ .NET	96
Микита Смоленський, Євген Сіденко, Юрій Кондратенко ПРОТОТИПУВАННЯ МОБІЛЬНОГО RFID-МОДУЛЯ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МЕДИЧНОГО ЗАКЛАДУ	100
Іван Сова, Олексій Козлов ТРАНСФЕР-НАВЧАННЯ ДЛЯ RF-ІДЕНТИФІКАЦІЇ БІЛА: АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ДОМЕН- АДАПТАЦІЇ	104

Євгеній Стоєв, Віктор Раленко АРХІТЕКТУРНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МАСШТАБОВАНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ПЛАГІНІВ	108
Анастасія Темна, Євгеній Стоєв ОПТИМІЗАЦІЯ АРХІТЕКТУРИ МАСШТАБОВАНИХ ВЕБЗАСТОСУНКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПІДХОДУ MICRO-FRONTENDS	112
Eduard Lysenkov PERCOLATION EFFECTS IN NANOCOMPOSITES BASED ON POLYLACTIC ACID AND CARBON NANOTUBES	116
Bohdan Somriakov, Svitlana Borovlova BIG DATA PROCESSING OPTIMIZATION USING APACHE SPARK DISTRIBUTED COMPUTING	120
Tetyana Sorokina THE IMPORTANCE OF HIGH-QUALITY VERIFICATION OF CONCRETE-REINFORCEMENT BOND IN CIVIL ENGINEERING	124
Олена Лазарєва ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПАРТИЦИПАТИВНОГО ПІДХОДУ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯМ	127
Ігор Перович ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ПРИБЕРЕЖНИХ ЗАХИСНИХ СМУГ	130
Лев Перович ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ САНІТАРНИХ ЗОН ДЖЕРЕЛ МІНЕРАЛЬНИХ ВОД	133
Анастасія Руда АНАЛІЗ МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ТА МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЗЕМЕЛЬ ПРИМОРСЬКИХ РЕГІОНІВ	136
Дмитро Стерлев ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ФОРМУВАННЯ ПРОЄКТУ ЗЕМЛЕУСТРОЮ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ РЕКРЕАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	140
Сергій Чорний ПРОБЛЕМА ВІТРОВОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ В КОНТЕКСТІ СУЧАСНИХ ЗМІН КЛІМАТУ	144

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES	12
Kateryna Antipova ADVERSARIAL ATTACKS ON DETECTORS OF GENERATED TEXTS	13
Andrii Ben, Artur Sokolov, Serhii Voronenko DECISION SUPPORT SYSTEM FOR OPTIMIZING THE CARGO PLAN OF A CONTAINER SHIP	16
Nadiia Boliubash, Olha Yaslyk CURRENT STATE AND PERSPECTIVES OF HANDWRITTEN DIGITS DETECTION, SEGMENTATION, AND RECOGNITION IN DIGITIZED DOCUMENTS OF COMPLEX FORMS	19
Nadiia Boliubash KNOWLEDGE-BASED APPROACH TO PROVIDING RECOMMENDATIONS FOR MAKING INVESTMENT DECISIONS USING TRANSFORMER MODELS	24
Stefaniia Bondarenko SELF-HEALING SOFTWARE TESTING	29
Oksana Brahinet PRACTICAL APPLICATION OF THE GRAPHICAL METHOD AND THE DICHOTOMY METHOD FOR NONLINEAR EQUATIONS IN MAPLE	33
Victor Gozhyi INTELLIGENT TECHNOLOGIES AND DIGITAL MARKETING TOOLS	38
Oleksandr Gozhyj, Iryna Kalinina CLASS IMBALANCE IN MACHINE LEARNING PROBLEMS	42
Valerii Dymo IMPROVING SEGMENTATION MODELS BY ACCOUNTING FOR UNCERTAINTY	46
Iryna Kalinina, Olexander Gozhyj INTELLIGENT FUEL EFFICIENCY ANALYSIS SYSTEM	50
Ihor Kandyba, Mykola Fisun USING MEDIAPIPE TO ASSESS STUDENTS' ATTENTION CONCENTRATION DURING LECTURES	55
Kateryna Kirei OPTIMIZATION OF HIGH-LOAD AUTHENTICATION SYSTEMS IN POINT-TO-POINT ARCHITECTURES	59
Oleksandr Kovaliv, Ievgen Sidenko, Galyna Kondratenko CONCEPTUAL MODEL OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR FORECASTING AND CLASSIFICATION OF EPIDEMIC RISKS UNDER NON-STATIONARY CONDITIONS	63

Mykyta Kolesnikov ANALYSIS OF METHODS AND ALGORITHMS FOR DETECTING AI-GENERATED MUSIC CONTENT	66
Ilya Krykalov, Yevhen Davydenko DECENTRALIZED SCHEDULE MANAGEMENT MODEL IN WEB APPLICATIONS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS	71
Inessa Kulakovska EFFICIENCY OF GREEDI AND Δ-GREEDI ALGORITHMS UNDER DELTA-MATROID CONSTRAINTS IN DISTRIBUTED SYSTEMS	75
Oleksandr Meshchaninov E-UNIVERSITY AS A SOCIAL NETWORK	79
Leonid Pelykhivskyi, Andrii Ben, Serhii Voronenko MODEL FOR ASSESSING THE COLLISION RISK OF MARITIME AUTONOMOUS SURFACE SHIPS TAKING INTO ACCOUNT ENVIRONMENTAL INFLUENCE FACTORS	82
Viktor Ralenko, Yevhenii Stoiev APPLICATION OF MICRO FRONTEND ARCHITECTURE FOR CREATING SCALABLE USER INTERFACES	85
Viktor Ralenko, Maryna Falenkova APPLICATION MODELS BASED ON ATTENTION MECHANISMS FOR SEMANTIC TEXT ANALYSIS	88
Maksym Saliutin, Yuriy Kondratenko, Ievgen Sidenko INT8-QUANTIZED YOLO26 MODELS FOR MOBILE MILITARY OBJECT RECOGNITION	91
Viktor Senishyn, Glib Horban ARCHITECTURAL APPROACHES TO BUILDING SCALABLE VIDEO PROCESSING SYSTEMS BASED ON .NET	96
Mykyta Smolenskyi, Ievgen Sidenko, Yuriy Kondratenko PROTOTYPING OF A MOBILE RFID MODULE FOR A HEALTHCARE INFORMATION SYSTEM	100
Ivan Sova, Oleksiy Kozlov TRANSFER LEARNING FOR RF-BASED UAV IDENTIFICATION: ANALYSIS OF DOMAIN ADAPTATION CHALLENGES	104
Yevhenii Stoiev, Viktor Ralenko ARCHITECTURAL PRINCIPLES OF BUILDING SCALABLE SYSTEMS BASED ON DYNAMIC PLUGIN LOADING	108
Anastasiia Temna, Yevhenii Stoiev OPTIMIZATION OF SCALABLE WEB APPLICATIONS ARCHITECTURE USING THE MICRO- FRONTENDS APPROACH	112

Eduard Lysenkov PERCOLATION EFFECTS IN NANOCOMPOSITES BASED ON POLYLACTIC ACID AND CARBON NANOTUBES	116
Bohdan Somriakov, Svitlana Borovlova BIG DATA PROCESSING OPTIMIZATION USING APACHE SPARK DISTRIBUTED COMPUTING	120
Tetyana Sorokina THE IMPORTANCE OF HIGH-QUALITY VERIFICATION OF CONCRETE-REINFORCEMENT BOND IN CIVIL ENGINEERING	124
Olena Lazariieva FEATURES OF THE APPLICATION OF THE PARTICIPATORY APPROACH IN THE LAND USE MANAGEMENT SYSTEM	127
Ihor Perovych DETERMINING THE BOUNDARIES OF COASTAL PROTECTION STRIPS	130
Lev Perovych TOPOGRAPHICAL AND GEODETIC PROVISION OF SANITARY ZONES OF MINERAL WATER SOURCES	133
Anastasiia Ruda ANALYSIS OF METHODOLOGICAL APPROACHES AND METHODS FOR LAND VALUATION IN COASTAL REGIONS	136
Dmitro Sterlev THEORY AND PRACTICE OF FORMING A LAND MANAGEMENT PROJECT FOR THE CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF RECREATIONAL FACILITIES	140
Sergiy Chornyy THE PROBLEM OF WIND EROSION OF SOILS IN THE CONTEXT OF CURRENT CLIMATE CHANGE	144

Розділ ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Section TECHNICAL SCIENCES

АДВЕРСАРІАЛЬНІ АТАКИ НА ДЕТЕКТОРИ ЗГЕНЕРОВАНОГО ТЕКСТУ

Тези представляють аналіз принципів роботи відомих детекторів. Розглянуті сучасні підходи до виявлення текстів, згенерованих великими мовними моделями, зокрема методи на основі заплутаності та методи глибокого навчання. Досліджено різні типи атак на детектори, включаючи адверсаріальні ускладнення та перефразування, що дозволяють обходити сучасні системи з високою ефективністю. Ітеративне перефразування є однією з найуспішніших стратегій, оскільки зберігає семантику тексту, водночас змінюючи його статистичні характеристики. Ризики, пов'язані з приховуванням авторства та уникненням виявлення плагіату, зумовлюють необхідність переходу від бінарної класифікації текстів до більш гнучких підходів для підвищення надійності виявлення.

Ключові слова: адверсаріальні атаки, великі мовні моделі, детектори, згенерований текст, перефразування.

Методи виявлення згенерованого тексту зазвичай поділяються на дві категорії: методи виявлення на основі заплутаності (*perplexity*) та методи на основі глибокого навчання. Методи на основі заплутаності намагаються використати той факт, що лексеми у вихідних даних, згенерованих великими мовними моделями (ВММ), як правило, будуть передбачатися самою моделлю як більш ймовірні. DetectGPT та FastDetectGPT – це ранні приклади детекторів на основі заплутаності, які аналізують локальну кривизну в просторі ймовірностей навколо заданого прикладу. Детектор Binoculars – це ще більш ефективний підхід, який використовує перехресну заплутаність між двома різними ВММ як сигнал того, що текст згенерований ШІ.

Методи на основі глибокого навчання намагаються використовувати нейронні мережі для виявлення згенерованого контенту, використовуючи великі набори даних, що містять відомі тексти, створені людьми та ШІ, і навчаючи класифікатор розрізняти їх. Класифікатор OpenAI був однією з перших спроб. Він використовує модель на основі RoBERTa для класифікації тексту, написаного людиною, та тексту, отриманого від GPT-2. Детектор Ghostbusters використовує вивчені комбінації ознак, отриманих з вбудованих мовних моделей, для виявлення згенерованого тексту.

Багато з цих популярних детекторів згенерованого тексту не працюють у практичних умовах. Потенційні атаки роблять більшість сучасних детекторів згенерованого тексту ненадійними [1].

Атаки з використанням підказок (prompts) становлять серйозний виклик для сучасних методів виявлення тексту, згенерованого ВММ. Якість такого тексту залежить від складності підказок, які дають моделі вказівки щодо генерації тексту. Зі збільшенням розміру моделі та корпусу навчальних даних моделі набувають можливостей навчання в контексті для генерації більш складного тексту. Розроблені численні ефективні методи підказок, включаючи підказки з кількома прикладами (*few-shot prompt*), комбіновані підказки (*combining prompt*), ланцюжок міркувань (*Chain of Thought*, CoT) та ланцюжок міркувань без прикладів (*zero-shot CoT*) тощо [2]. Існуючі роботи з детекторів тексту, згенерованого LLM, переважно використовують набори даних, створені за допомогою простих прямих підказок. Наприклад, дослідження [3] демонструє, що детектори можуть мати труднощі з ідентифікацією тексту, згенерованого за допомогою складних підказок. Автори [4] продемонстрували помітне зниження здатності до виявлення детектора, що використовує донавчену мовну модель, при зіткненні з різноманітними підказками. Отже, використання різних підказок призводить до значних відмінностей у продуктивності виявлення існуючих детекторів.

Звичайні тексти, згенеровані ВММ, легко ідентифікувати, проте **адверсаріальні ускладнення (adversarial perturbations)**, такі як заміна слів, можуть ефективно знизити точність детекторів. Подібні атаки включають усікання (вирізання частини ознаки або вхідних даних), перетасування (випадкове порушення порядку слів у вхідних даних), мутацію символів і слів, заміну слів (заміну на інші слова, що відповідають контексту) та помилки в написанні. Дослідження [5, 6] демонструють ефективність підходу на основі перестановок для атак на детектори. Зокрема, автори [5] замінили слова на синоніми на основі контексту, що виявилось ефективною

атакою на донавчений класифікатор, детектор з водяними знаками (*watermarking*) та DetectGPT: продуктивність детекторів знизилася на 18%, 10% та 25% відповідно.

Хоча існуючі методи виявлення є дуже чутливими до атак, різні типи детекторів демонструють різний ступінь стійкості. У своїй роботі [7] автори продемонстрували, що контрольоване навчання є ефективним захисним підходом проти цих атак: навчання на суперечливих зразках може значно покращити здатність детектора розпізнавати тексти, які були піддані маніпуляціям у результаті таких атак.

Атаки на основі перефразування є одними з найефективніших атак, здатних повністю обходити детектори, що використовують технологію водяних знаків, а також донавчені детектори з контрольованим навчанням та детектори без попереднього навчання. Основний принцип полягає у застосуванні полегшеної моделі перефразування до вихідних даних ВММ та зміні розподілу лексичних і синтаксичних ознак тексту шляхом перефразування, що дозволяє ввести детектор в оману. Автори [8] досліджували модель перефразування на основі моделі T5 та DIPPER, моделі, яка дозволяє налаштовувати різноманітність перефразування та ступінь переупорядкування вмісту, що ставить під сумнів загальну перевагу існуючих методів виявлення.

Атаки на основі перефразування стали найефективнішою стратегією ухилення. Ці атаки систематично перефразовують контент, згенерований ШІ, зберігаючи семантичне значення, ефективно «відмиваючи» синтетичний текст, щоб він виглядав як написаний людиною [9]. Сучасні техніки, такі як ітеративне перефразування, значно знижують ефективність виявлення, зберігаючи при цьому якість тексту [10]. На відміну від методів, що вимагають глибоких технічних знань, перефразування легко реалізувати, що призводить до різкого падіння точності найсучасніших детекторів майже до рівня випадкового результату, створюючи серйозні ризики – від освіти до інформаційної безпеки.

Ітеративне перефразування спричиняє семантичні зміни, зберігаючи при цьому шаблони генерації. Цей механізм уможливорює два різних сценарії атак:

- **Приховування авторства.** Текст, написаний людиною, що піддається ітеративному перефразуванню, зберігає стилістичні ознаки, характерні для людського письма, незважаючи на семантичний зсув, створюючи «сліпі зони» для виявлення, що дозволяє незаконно привласнювати людські тексти.

- **Уникнення виявлення плагіату.** Згенерований текст, що піддається ітеративному перефразуванню, зберігає шаблони генерації, характерні для ШІ, одночасно досягаючи достатньої семантичної трансформації, щоб уникнути систем виявлення плагіату, сприяючи академічній недобросовісності.

До популярних сервісів перефразування належать такі:

- GPTInf. Текст високої якості. Дуже рідко виникають проблеми з орфографією, пунктуацією або лексикою.
- Grammarly. Коректне різноманітне використання пунктуації. Дуже рідко робить незвичні правки, такі як подвійні лапки навколо заголовка або додавання несподіваних слів.
- HumanizeAI.pro. Незначна кількість граматичних помилок, розширений словниковий запас та правильна пунктуація.
- Quillbot. Створює занадто вишуканий текст, який, однак, залишається читабельним. Рівень лексики високий, хоча й дещо неточний.
- Semihuman AI. Текст високої якості. Іноді вводить особисті займенники, навіть якщо їх немає в оригінальному тексті.
- StealthGPT. Текст високої якості. Результат тісно відповідає стилю оригінального тексту.
- Twixify. Загалом текст високої якості. Іноді неправильно використовує слова через заміни, знайдені в словнику.

Деякі сервіси зберігають базову структуру речень і просто замінюють окремі слова на синоніми. Інші демонструють більшу свободу у зміні вихідного тексту, іноді перефразовуючи цілі групи речень та абзаців. Деякі додають речення, яких спочатку не було, або видаляють зайві речення. Методи перефразування, побудовані на основі ВММ, зазвичай менш тісно пов'язані з вихідним текстом, на відміну від методів, що працюють на основі правил і замінюють слова на синоніми.

Ітеративне перефразування тексту, написаного людиною (приховування авторства), та ітеративне перефразування згенерованого тексту (уникнення виявлення плагіату), представляють принципово різні ризики, проте обидва використовують одну й ту саму проміжну зону «відмивання». Незалежно від походження, перефразування текстів сходяться до цього проміжного семантичного простору, що характеризується семантичним зміщенням у поєднанні зі збереженням шаблонів генерації. Отже, потрібно реалізувати:

- вихід за межі бінарної класифікації «написаний чи згенерований текст», щоб відобразити, як тексти різного походження проходять через проміжну зону та займають її;

– декілька рівнів ітеративного перефразування для оцінки надійності детектора в міру того, як тексти поступово потрапляють у цю зону, стійку до виявлення.

References

1. Masrour, E., Emi, B., & Spero, M. (2025). DAMAGE: Detecting Adversarially Modified AI Generated Text. doi: 10.48550/arXiv.2501.03437.
2. Wu, J., Yang, S., Zhan, R., Yuan, Y., Wong, D. F., & Chao, L. S. (2023). A Survey on LLM-generated Text Detection: Necessity, Methods, and Future Directions. *ArXiv, abs/2310.14724*. doi: 10.48550/arXiv.2310.14724.
3. Guo, B., Zhang, X., Wang, Z., Jiang, M., Nie, J., Ding, Y., Yue, J., & Wu, Y. (2023). How Close is ChatGPT to Human Experts? Comparison Corpus, Evaluation, and Detection. doi: 10.48550/arXiv.2301.07597.
4. Liu, Z., Yao, Z., Li, F., & Luo, B. (2023). On the Detectability of ChatGPT Content: Benchmarking, Methodology, and Evaluation through the Lens of Academic Writing. *Proceedings of the 2024 on ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. doi: 10.48550/arXiv.2306.05524.
5. Shi, Z., Wang, Y., Yin, F., Chen, X., Chang, K., & Hsieh, C. (2023). Red Teaming Language Model Detectors with Language Models. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, 12, 174-189. doi: 10.48550/arXiv.2305.19713.
6. He, X., Shen, X., Chen, Z., Backes, M., & Zhang, Y. (2023). MGTBench: Benchmarking Machine-Generated Text Detection. *Proceedings of the 2024 on ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. doi: 10.48550/arXiv.2303.14822.
7. Antoun, W., Mouilleron, V., Sagot, B., & Seddah, D. (2023). Towards a Robust Detection of Language Model-Generated Text: Is ChatGPT that easy to detect? doi: 10.48550/arXiv.2306.05871.
8. Sadasivan, V. S., Kumar, A., Balasubramanian, S., Wang, W., & Feizi, S. (2023). Can AI-Generated Text be Reliably Detected? doi: 10.48550/arXiv.2303.11156.
9. Krishna, K., Song, Y., Karpinska, M., Wieting, J., & Iyyer, M. (2023). Paraphrasing evades detectors of AI-generated text, but retrieval is an effective defense. doi: 10.48550/arXiv.2303.13408.
10. Cheng, Y., Sadasivan, V. S., Saberi, M., Saha, S., & Feizi, S. (2025). Adversarial Paraphrasing: A Universal Attack for Humanizing AI-Generated Text. doi: 10.48550/arXiv.2506.07001.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.01

Kateryna Antipova

ADVERSARIAL ATTACKS ON DETECTORS OF GENERATED TEXTS

The theses present an analysis of the operating principles of well-known detectors. Modern approaches to detecting texts generated by large language models are considered, in particular, methods based on perplexity and deep learning methods. Various types of attacks on detectors are investigated, including adversarial perturbations and paraphrasing, which allow for highly effective circumvention of modern systems. Iterative paraphrasing is one of the most successful strategies, as it preserves the semantics of the text while changing its statistical characteristics. The risks associated with concealing authorship and avoiding plagiarism detection necessitate a transition from binary text classification to more flexible approaches to increase detection reliability.

Keywords: adversarial attacks, detectors, generated text, large language models, paraphrasing.

Відомості про автора / Information about the Author

Катерина Антіпова, PhD, доцентка (б. в. з.) кафедри інженерії програмного забезпечення факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: antipova.katerina@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9012-5290>.

Kateryna Antipova, PhD, Associate Professor (w/o a. d.) of the Department of Software Engineering, Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: antipova.katerina@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9012-5290>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.02

Андрій Бень,
Артур Соколов,
Сергій Вороненко

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ОПТИМІЗАЦІЇ ВАНТАЖНОГО ПЛАНУ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ

Тези присвячені розробленню системи підтримки прийняття рішень з оптимізації вантажного плану контейнеровозу в умовах мультипортових контейнерних перевезень. Розглянуто актуальність підвищення ефективності планування вантажних операцій у сучасному суднопластві, зокрема через зменшення кількості нераціональних переміщень контейнерів на судні, скорочення часу перебування судна в портах та зниження витрат на виконання вантажних операцій.

Наголошується, що формування вантажного плану контейнеровозу для рейсу між кількома портами є складним процесом, оскільки у проміжних портах виникає потреба у додаткових вантажних операціях та корегуванні вже сформованого плану. У роботі запропоновано структуру спеціалізованої системи підтримки прийняття рішень, яка забезпечує формування множини майстер-планів для портів рейсу, оптимізацію вантажного плану відповідно до умов поточного порту, розрахунок параметрів остійності та міцності корпусу судна, оптимізацію портових і судових вантажних операцій, а також оцінювання економічних показників виконання рейсу.

Особливу увагу приділено використанню гнучких стратегій вибору оптимізаційних процедур, що враховують пріоритети судновласника або перевізника під час формування вантажного плану. Запропонована система дозволяє підтримувати особу, яка приймає рішення, у виборі найкращих варіантів вантажних планів з урахуванням економічних, технічних та експлуатаційних обмежень.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень, контейнеровоз, вантажний план, мультипортові перевезення, контейнерні перевезення, оптимізація, майстер-план, вантажні операції, шифтінг контейнерів, остійність судна, міцність корпусу, судновласник, логістика.

На поточний момент часу стрімкий розвиток інформаційних технологій сприяє ускладненню логістичних ланцюжків поставок товарів, що сприяє збільшенню частки мультипортових перевезень контейнерів у сучасному суднопластві. Підвищення економічної ефективності виконання рейсу, в свою чергу, може бути досягнуто, перш за все, за рахунок скорочення витрат, пов'язаних із знаходженням судна в портах, зменшенням часу виконання та вартістю вантажних операцій, тощо. У випадку контейнерних перевезень це може бути здійснено шляхом зменшення кількості нераціональних переміщень (шифтінгу) контейнерів на судні під час виконання вантажних операцій [1].

Таким чином, наразі існують нагальні потреби врахування різних запитів практики при керуванні процесом формування вантажних планів контейнеровозів.

Постає проблема розробки гнучких оптимізаційних стратегій вибору пріоритетів у прийнятті рішень, які повинні враховувати при плануванні перевезень вантажів існуючі потреби судновласника. Одним з найбільш доцільних шляхів вирішення вищезазначеної проблеми є створення спеціалізованих СППР, особливо для планування мультипортових перевезень, що відрізняються складною структурою процесу планування та необхідністю внесення постійних змін до вже сформованого вантажного плану судна [2].

У випадку формування вантажного плану для рейсу судна, що відбувається між кількома портами, процес його побудови ускладнюється тим, що у проміжних портах можливе здійснення додаткових вантажних операцій, які потребують внесення змін до вже сформованого вантажного плану, і відповідно виникає потреба його корегування у кожному з проміжних портів.



Рисунок 1 – Структура СППР з формування вантажного плану контейнеровозу для мультипортних контейнерних перевезень [3]

Виходячи з вищенаведених особливостей процесів обробки інформації при формуванні вантажного плану контейнеровозу, а також специфіки його створення та корегування в умовах здійснення мультипортних перевезень, було розроблено структуру СППР для керування таким процесом та визначено перелік її основних функцій [3].

Функціонально зазначена СППР забезпечує виконання наступних задач:

- формування множини майстер планів для кожного з портів рейсу судна;
- уточнення й оптимізацію відібраного майстер плану до вантажного плану у відповідності потребами поточного порту;
- розрахунок параметрів остійності та міцності корпусу судна;
- оптимізацію виконання вантажних операцій на судні і портів терміналах;
- розрахунок економічних показників виконання рейсу;
- вибір та рекомендація ОПР найкращих варіантів вантажних планів відповідно до заданої нею стратегії пріоритетів прийняття рішень.

Висновки. Розроблено структуру СППР з оптимізації вантажного плану контейнеровозу для мультипортних контейнерних перевезень та визначено перелік її основних функцій. Запропоновано використання гнучких стратегій вибору оптимізаційних процедур, що враховують пріоритети судовласника (або перевізника) до процесу формування вантажного плану судна.

References

1. Бень А. П., Федоров А. І. Формування вантажного плану контейнеровозу при здійсненні мультипортних перевезень. Судноводіння. 2019. №29. С. 10–19. DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.10-19
2. Бень А. П., Соколов А. В., Соловей О. С. Система підтримки прийняття рішень з формування вантажного плану контейнеровозу. Матеріали V Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету, МРР&О-2024. – Одеса, 2024. С. 293–295. https://drive.google.com/file/d/19Uq4DCIUfKISGyp3zMyIEhMN2cDrHINs/view?usp=drive_link
3. Бень А. П., Соколов А. В. Система підтримки прийняття рішень з формування вантажних планів контейнеровозів. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2024. № 1 (28). С. 175-184. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.175-184>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.02

Andrii Ben
Artur Sokolov
Serhii Voronenko

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR OPTIMIZING THE CARGO PLAN OF A CONTAINER SHIP

The theses are devoted to the development of a decision support system for optimizing the cargo plan of a container ship under conditions of multi-port container transportation. The relevance of improving the efficiency of cargo operation planning in modern shipping is considered, in particular by reducing the number of irrational container movements on board, decreasing the vessel's port stay time, and lowering the costs of cargo operations.

It is emphasized that the formation of a container ship's cargo plan for a voyage between several ports is a complex process, since intermediate ports may require additional cargo operations and the adjustment of an already developed plan. The paper proposes the structure of a specialized decision support system that provides for the formation of a set of master plans for the ports of the voyage, optimization of the cargo plan in accordance with the conditions of the current port, calculation of the vessel's stability and hull strength parameters, optimization of port and shipboard cargo operations, as well as assessment of the economic indicators of the voyage.

Particular attention is paid to the use of flexible strategies for selecting optimization procedures that take into account the priorities of the shipowner or carrier during the formation of the cargo plan. The proposed system supports the decision-maker in selecting the best cargo plan options, taking into account economic, technical, and operational constraints.

Key words: decision support system, container ship, cargo plan, multi-port transportation, container transportation, optimization, master plan, cargo operations, container shifting, vessel stability, hull strength, shipowner, logistics.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Андрій Бень доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9029-3489>.

Andrii Ben, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work of Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9029-3489>.

Артур Соколов, аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: arthursokolov7@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3115-3854>.

Artur Sokolov, PhD student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: arthursokolov7@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3115-3854>.

Сергій Вороненко, кандидат технічних наук, доцент кафедри Експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: voronenko447@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9606-6538>.

Serhii Voronenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Operation of Ship Electrical Equipment and Automation, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: voronenko447@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9606-6538>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.03

Надія Болюбаи,
Ольга Яслик

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЕТЕКЦІЇ, СЕГМЕНТАЦІЇ Й РОЗПІЗНАВАННЯ РУКОПИСНИХ ЦИФР В ОЦИФРОВАНИХ ДОКУМЕНТАХ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

Розкрито сучасний стан і проблеми детекції, сегментації та розпізнавання рукописних цифр в оцифрованих документах складної форми на основі аналізу можливостей традиційних підходів до оптичного розпізнавання символів (OCR), згорткових нейронних мереж та сучасних трансформерних моделей (DETR, LayoutLM, SegFormer, Donut, Swin, TrOCR). Виявлено, що перспективним напрямом подальших досліджень для підвищення точності розпізнавання рукописних цифр є створення інтегрованих transformer-based систем, у яких етапи попередньої обробки, детекції, сегментації та розпізнавання реалізуються в межах єдиної узгодженої архітектури.

Ключові слова: оптичне розпізнавання символів, розпізнавання рукописних цифр, оцифровані документи складної форми, розуміння документів, трансформерні моделі, детекція числових областей, сегментація символів.

Актуальність та постановка проблеми. В умовах інтенсивної цифрової трансформації усіх сфер сучасного суспільства зростає актуальність задачі оптичного розпізнавання символів (*Optical Character Recognition, OCR*) та, зокрема, цифр, спрямованої на автоматизоване вилучення інформації з великих масивів сканованих документів. Значна кількість оцифрованих документів має складну форму, оскільки може включати друкований і рукописний текст, таблиці, діаграми та нетекстову інформацію, яка важко піддається інтерпретації – бланки, підписи, печатки. Однак значна частина сучасних OCR-рішень демонструє високу ефективність переважно на простих або напівструктурованих документах, тоді як документи складної форми залишаються проблемним класом. Це уповільнює робочі процеси, пов'язані із отриманням із таких документів інформації для її подальшого використання, оскільки потребує ручної валідації вилучення та обробки даних.

Проблема автоматизованого вилучення числових даних із оцифрованих документів є критично важливою у різних сферах оточуючої дійсності: державних установах, архівах, фінансових та бізнесових організаціях, медицині, логістиці, на промислових підприємствах. Особливу складність становлять оцифровані документи складної форми, такі як відскановані оригінали документів осіб, анкети, виписки, рахунки-фактури, таблиці обліку, форми звітності, архівні реєстри, де значна частина інформації представлена рукописними цифрами. Це ускладнює процес розпізнавання, оскільки рукописні тексти написані зі злиттям символів, стилі запису яких можуть суттєво відрізнятися і мати великі варіації форми, розміру, нахилу, текстури та фону. Рукописні символи та цифри часто можуть частково перекриватися лініями таблиці або форми, мати деформації через нерівномірне заповнення форм, розміщуватися у складних просторових структурах без чітко визначених меж. Основні труднощі виникають на етапах локалізації числових областей, сегментації окремих символів та їх подальшого розпізнавання.

Таким чином, задача розпізнавання рукописних цифр в оцифрованих документах складної форми є багатокомпонентною та включає взаємопов'язані підзадачі детекції, сегментації і класифікації, що потребують врахування як локальних ознак зображення, так і глобальної структури документа. Незважаючи на суттєвий прогрес у сфері оптичного розпізнавання символів, забезпечення високої точності розпізнавання рукописних числових даних у оцифрованих документах складної форми залишається відкритою науково-практичною проблемою. Її розв'язання потребує вдосконалення всіх етапів обробки – від попередньої обробки детекції та сегментації до розпізнавання і постобробки результатів, а також адаптації моделей до специфіки текстів з рукописними цифрами.

Аналіз існуючих досліджень. Ранні системи оптичного розпізнавання тексту базувалися на класичних OCR-підходах і традиційних методах, які передбачали послідовне виконання етапів попередньої обробки зображення, виділення контурів символів, ручного вилучення ознак та подальшої класифікації. До них належать методи порогової бінаризації, морфологічні операції, аналіз зв'язних компонент та дескриптори ознак типу HOG (*Histogram of Oriented Gradients*). Ці методи демонструють прийнятні результати для друкованих текстів або ізольованих символів, проте їх застосування до рукописних цифр у документах складної форми є обмеженим через високу чутливість до шумів, варіативність почерків та недостатню здатність враховувати складні просторові залежності та контекст документа [1].

Із розвитком глибокого навчання значного поширення набули згорткові нейронні мережі (*Convolutional Neural Network, CNN*), здатні автоматично виділяти просторові ознаки зображень. Архітектури типу LeNet та більш глибокі моделі, такі як ResNet та їх модифікації, набули широкого застосування для задач розпізнавання друкованих та рукописних символів і цифр. CNN-класифікатори демонструють високу точність розпізнавання (понад 99%) ізольованих рукописних цифр на стандартизованих наборах даних, таких як MNIST [2]. Однак у випадку реальних оцифрованих документів їх ефективність може суттєво знижуватися через обмежене врахування глобальних просторових залежностей та складність аналізу контексту документа. Суттєвим недоліком CNN-based моделей є залежність від багатокomпонентного процесу обробки (*pipeline*), у якому етапи попередньої обробки, детекції, сегментації та розпізнавання реалізуються окремо, що спричиняє накопичення помилок між етапами (*error propagation*) та зниження загальної точності системи при обробці документів складної форми [3, 4].

Аналіз сучасних досліджень свідчить про активний розвиток transformer-based підходів у галузі оптичного розпізнавання символів, аналізу структури документів (*Document Layout Analysis*) та розуміння документів (*Document Understanding*). OCR-моделі на основі трансформерів, такі як TrOCR, демонструють високу ефективність для задач розпізнавання друкованого та рукописного тексту завдяки використанню encoder-decoder архітектур із механізмом самоуваги (*self-attention*) [5]. Такі моделі поєднують transformer encoder для обробки візуального представлення документа та transformer decoder для генерації текстової послідовності. Подальший розвиток отримали підходи на основі трансформерів зору (*Vision Transformer, ViT*), які забезпечують ефективне моделювання глобальних просторових залежностей у зображеннях, а також OCR архітектури decoder-only типу, що розглядають задачу розпізнавання як процес послідовної генерації тексту [1].

Одночасно значного прогресу досягнуто у напрямі розуміння документів із врахуванням їх структурного та семантичного контексту. Модель LayoutLM (*Layout Language Model*) інтегрує текстові, візуальні та просторові ознаки, що дозволяє ефективно моделювати структуру документа та взаємозв'язки між його елементами. Подальші модифікації, такі як LayoutLMv2 та LayoutLMv3, розширили можливості мультимодального аналізу документів завдяки більш ефективній інтеграції текстових, візуальних і просторових представлень [6]. Іншим важливим напрямом є модель Donut (*Document Understanding Transformer*) – OCR-free підхід до розуміння документів, який перетворює зображення документа безпосередньо у структуровані дані без проміжного етапу текстового OCR, що дозволяє зменшити накопичення помилок у процесі послідовної обробки (*pipeline*) [7]. Важливою перевагою transformer-підходів є здатність враховувати глобальний контекст зображення та просторові залежності між елементами документа, що є особливо важливим для оцифрованих документів складної форми, де розташування об'єктів часто має семантичне значення.

Паралельно активно розвиваються transformer-based рішення для задач детекції та сегментації об'єктів. Моделі типу DETR (*Detection Transformer*) реалізують end-to-end детекцію об'єктів без використання anchor-based механізмів, що дозволяє більш ефективно локалізувати об'єкти складної форми. Водночас моделі SegFormer (*Segmentation with Transformer*) та Swin Transformer (*Shifted Window Transformer*) демонструють перспективні результати у задачах семантичної сегментації та аналізу складних візуальних структур [8–10]. Такі архітектури є особливо перспективними для задач обробки оцифрованих документів складної форми з рукописними символами завдяки здатності моделювати як локальні, так і глобальні просторові залежності, що є критично важливим для аналізу таблиць, бланкових структур та багатокomпонентних документів. У контексті розв'язання задачі розпізнавання рукописних цифр DETR доцільно використовувати для детекції числових областей, SegFormer – для сегментації окремих символів. А Swin Transformer може застосовуватися як базова модель вилучення ознак для подальшого розпізнавання рукописних цифр у поєднанні з класифікаційними або OCR-модулями.

Проведений аналіз показав, що основні невирішені проблеми розпізнавання рукописних цифр в оцифрованих документах включають недостатню стійкість моделей до шумів та артефактів сканування, відсутність уніфікованих підходів до одночасного врахування локальних і глобальних ознак, а також розрив між підходами до розуміння документів і задачами детального розпізнавання рукописних цифр (*fine-grained digit recognition*).

Додатковим обмеженням є недостатня кількість спеціалізованих наборів даних для навчання моделей на документах складної форми з рукописними цифрами. Окремо слід відзначити, що існуючі підходи недостатньо ефективно вирішують задачу вилучення числових даних із оцифрованих документів, які містять табличні структури, шуми, артефакти сканування, потребують сегментації окремих символів, а також поєднують друкований і рукописний текст. Існує нагальна потреба поєднання переваг transformer-based моделей для аналізу структури та контекстного розуміння оцифрованих документів із високоточними методами розпізнавання ізольованих рукописних символів.

Виявлено, що незважаючи на значний прогрес transformer-based моделей, на сьогодні обмежено представлені комплексні підходи, здатні одночасно ефективно вирішувати задачі детекції, сегментації та розпізнавання рукописних цифр. Існуючі дослідження переважно зосереджені або на оптичному розпізнаванні символів, або на аналізі структури документа, або на окремих задачах детекції та сегментації. Задача одночасної детекції, сегментації та розпізнавання рукописних цифр у документах складної форми залишається недостатньо дослідженою, що обумовлює актуальність подальших розробок у напрямі створення інтегрованих transformer-based рішень для комплексної обробки оцифрованих документів складної форми.

Проблеми детекції, сегментації та розпізнавання рукописних цифр в оцифрованих документах складної форми. Автоматизоване вилучення та розпізнавання числової інформації на основі аналізу структури та контексту оцифрованого документа передбачає послідовність взаємопов'язаних етапів обробки, яка включає попередню обробку, детекцію, сегментацію, розпізнавання та постобробку результатів. При цьому ключовими в обробці документів складної форми є три взаємопов'язані етапи: детекція числових областей, сегментація окремих символів та подальше розпізнавання рукописних цифр. Кожен із цих етапів характеризується специфічними типами помилок, що суттєво впливають на кінцеву точність системи.

На етапі детекції основною задачею є локалізація областей, які містять рукописні цифри. Типовими помилками детекції є виявлення нечислових областей як цифр (*false positives*) та втрата дрібних або частково перекритих цифр (*missed detections*). У документах складної форми такі помилки обумовлені наступними особливостями їх структури та вмісту: 1) геометричними викривленнями (перекося сканування, перспективні деформації); 2) наявністю структурних елементів (таблиці, бланки), межі яких можуть формувати додаткові хибні контури; 3) перекриттям рукописних символів друкованими елементами (лінії, штампи, підписи); 4) низьким контрастом між цифрами та фоном.

Одним із найбільш критичних етапів задачі розпізнавання рукописних цифр є сегментація, оскільки помилки на цьому рівні безпосередньо впливають на якість подальшого розпізнавання символів. Типовими помилками сегментації є об'єднання кількох цифр в одну область (*under-segmentation*) та розбиття однієї цифри на кілька частин (*over-segmentation*). Основними причинами виникнення таких помилок є: 1) злиття символів (*touching characters*), коли дві (або більше) цифри сприймаються як єдиний об'єкт; 2) фрагментація одного символу, коли одна цифра може бути розділена на кілька компонентів; 3) перекриття символів елементами форми (табличні лінії, межі комірок); 4) варіативність товщини штриха рукописного написання.

Виявлені проблеми детекції та сегментації є особливо вираженими для традиційних методів розпізнавання символів та CNN-based підходів, оскільки такі моделі переважно спираються на локальні ознаки. Навіть у глибоких CNN-архітектурах рецептивне поле є обмеженим, а глобальний контекст формується опосередковано, що є недостатнім для документів складної форми, де важливі довгострокові просторові залежності. Особливо критичним є втрата просторового контексту, який у таких документах несе семантичну інформацію (позиція в таблиці, тип поля). Водночас відсутнє явне моделювання структури документа: не враховується позиція елемента в документі, взаємозв'язки між комірками таблиці та логічна структура форми. Ускладнює коректну локалізацію й розділення рукописних цифр багатокomпонентна послідовність обробки оцифрованих документів, що призводить до накопичення помилок, труднощів інтеграції та низької узгодженості етапів. Таким чином, класичні OCR-підходи та CNN-моделі мають фундаментальні обмеження для задачі розпізнавання рукописних символів у документах складної форми.

Трансформерні моделі (DETR, LayoutLM, SegFormer, Donut, Swin, TrOCR) частково долають зазначені обмеження, забезпечуючи інший підхід завдяки механізму самоуваги, який дозволяє моделювати довгострокові залежності між усіма елементами зображення та враховувати контекст документа. Загалом transformer-based рішення характеризуються вищою масштабованістю до різних типів документів і підвищеною стійкістю до шумів та артефактів сканування. До їх недоліків належать високі вимоги до обсягу даних і обчислювальних ресурсів, однак на сьогодні вони є одними з найбільш перспективних підходів для розпізнавання рукописних цифр у оцифрованих документах складної форми.

Детекція з використанням моделі DETR реалізується як задача множинного передбачення без використання anchor boxes, що дозволяє: 1) уникнути ручного налаштування анкерів; 2) ефективніше моделювати складні

просторові конфігурації; 3) забезпечити end-to-end детекцію об'єктів. Модель TrOCR також забезпечує end-to-end підхід, використовуючи vision encoder та text decoder, що дозволяє обходити явний етап сегментації символів. Використання ієрархічного transformer-енкодера та легкого декодера (*lightweight decoder*) у моделі SegFormer дозволяє ефективно виконувати семантичну сегментацію без складних постпроцесів, підвищуючи стійкість до шуму та забезпечуючи моделювання глобального контексту і нерегулярних структур. Swin Transformer, завдяки механізму самоуваги зі зміщеними вікнами (*shifted window self-attention*) та ієрархічній організації ознак, забезпечує ефективне моделювання як локальних, так і глобальних візуальних залежностей, що є важливим для аналізу складних форм оцифрованих документів.

Проте зазначені вище проблеми детекції та сегментації не усуваються моделями трансформерів повністю, а лише частково зменшуються. Крім того, навіть за умови коректної детекції та сегментації, розпізнавання цифр в оцифрованих документах складної форми залишається ускладненим через відсутність контексту документа на рівні окремого символу, деградацію зображень (шум, розмиття, артефакти стиснення) та високу внутрішньокласову варіативність і міжкласову схожість цифр (наприклад: 1 і 7, 3 і 8, 5 і 6), обумовлену їх рукописним характером. Це визначає доцільність подальших досліджень у напрямі transformer-based підходів для обробки рукописних цифр в оцифрованих документах складної форми, спрямованих на підвищення якості та точності їх розпізнавання.

Перспективи подальших досліджень. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка інтегрованих transformer-based підходів, здатних забезпечити наскрізну (*end-to-end*) обробку рукописних символів в оцифрованих документах складної форми з урахуванням їх структури та контексту. На відміну від класичних OCR-рішень, де етапи попередньої обробки, детекції, сегментації та розпізнавання реалізуються переважно незалежно, сучасні трансформерні архітектури відкривають можливості для побудови інтегрованих систем обробки, що враховують як локальні ознаки символів, так і глобальні просторові залежності в документі. Особливо перспективним є поєднання моделей класу DETR для локалізації числових областей, SegFormer для сегментації символів та TrOCR або Vision Transformer для їх подальшого розпізнавання. Важливим напрямом також є подальші дослідження у напрямі використанні підходів до розуміння документів, які дозволяють враховувати не лише візуальні характеристики окремих символів, а й семантичний контекст їх розташування. Перспективним є створення систем, здатних поєднувати розпізнавання рукописних символів із аналізом структури документа, що сприятиме підвищенню точності вилучення числової інформації з оцифрованих документів складної форми.

Окремою проблемою є відсутність спеціалізованих загально доступних датасетів для навчання моделей розпізнавання рукописних цифр в оцифрованих документах складної форми, що обумовлює необхідність подальших розробок у напрямі формування інтегрованих датасетів шляхом об'єднання та адаптації існуючих наборів даних для задач детекції, сегментації і розпізнавання.

Висновки. Проведений аналіз свідчить, що класичні OCR-підходи мають обмежену ефективність у задачах розпізнавання рукописних цифр через високу чутливість до шумів та необхідність ручного виділення ознак. CNN-based моделі забезпечують покращення точності, однак їх обмежене врахування глобального контексту документа та залежність від багатокомпонентних послідовностей обробки знижують ефективність при обробці оцифрованих документів складної форми. Виявлено, що трансформерні архітектури завдяки механізму самоуваги забезпечують комплексне врахування локальних і глобальних залежностей та відкривають можливості для побудови інтегрованих систем, у яких етапи попередньої обробки, детекції, сегментації та розпізнавання реалізуються в межах єдиної (*unified*) архітектури. Як основа для побудови такої системи можуть бути використані моделі DETR, SegFormer, Swin Transformer та TrOCR. Це обумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на розробку інтегрованих transformer-based архітектур для спільної детекції, сегментації та розпізнавання рукописних цифр у документах складної форми.

References

1. Zhou S. A Survey on Transformer for Optical Character Recognition. *Academic Journal of Science and Technology*. 2026, vol. 19, no. 2, pp. 395-400. URL: <https://doi.org/10.54097/fdgc6p75>
2. Alhamad H., Shehab M., Shambour M., Abu-Hashem M., Abuthawabeh A., Al-Aqrabi H., Daoud M., and Shannaq F. Handwritten Recognition Techniques: A Comprehensive Review. *Symmetry*. 2024, vol. 16, no. 6, p. 681. URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/16/6/681>
3. Болубаш Н.М. Автоматизація обробки оцифрованих документів із рукописними символами у державному секторі. *Технічні науки та інженерія: матеріали XXI міжнародної наукової конференції «Ольвійський форум – 2024: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі»*. Миколаїв: Вид-во ЧНУ імені П. Могили,

2024. C. 36-40. URL: <https://dSPACE.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2349/1/ОФ-2024.%20Технічні%20науки%20та%20інженерія.pdf#page=36>
4. Boliubash N.M., Yevtushenko O.N. Automating Digitized Document Processing with Handwritten Digits in the Public Sector using Convolutional Neural Networks. *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*. 2025, vol. 20, pp. 019. URL: <https://doi.org/10.28945/5527>
5. Li M., Lv T., Cui L., Lu Y., Florencio D., Zhang C., Wei F. TrOCR: Transformer-based Optical Character Recognition with Pre-Trained Models. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2023, vol. 37, no. 11, pp. 13094–13102. URL: <https://doi.org/10.1609/aaai.v37i11.26438>
6. Huang Y., Lv T., Cui L., Lu Y. and Wei F. LayoutLMv3: Pre-Training for Document AI with Unified Text and Image Masking. *Proceedings of the 30th ACM International Conference on Multimedia*. 2022, pp. 4083-4091. URL: <https://doi.org/10.1145/3503161.3548112>
7. Kim G., Hong T., Yim M., Nam J., Park J., and Yim J. OCR-Free Document Understanding Transformer (Donut). *Proceedings of the 17th European Conference on Computer Vision (ECCV)*. 2022, p. XXVIII, pp. 498–517. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-19815-1_29
8. Alvarez Perez R. and Barrón Fernandez R. Fine tuning Transformers models for converting handwritten scientific texts into LaTeX format. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*. 2026, vol. 17, no 2, pp. 38–54. URL: <https://doi.org/10.61467/2007.1558.2026.v17i2.1266>
9. Xie E., Wang W., Yu Z., Anandkumar A., Alvarez J. M., Luo P. SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers. *Proceedings of the 35th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. 2021. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.15203>
10. Ding Y., Luo S., Dai Y. et al. A Survey on MLLM-based Visually Rich Document Understanding: Methods, Challenges, and Emerging Trends. 2025. URL: <http://arxiv.org/abs/2507.09861v1>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.03

Nadiia Boliubash,
Olha Yaslyk

CURRENT STATE AND PERSPECTIVES OF HANDWRITTEN DIGITS DETECTION, SEGMENTATION, AND RECOGNITION IN DIGITIZED DOCUMENTS OF COMPLEX FORMS

The current state and challenges of handwritten digit detection, segmentation, and recognition in digitized documents of complex form are examined based on the analysis of the capabilities of traditional optical character recognition (OCR) approaches, convolutional neural networks, and modern transformer-based models (DETR, LayoutLM, SegFormer, Donut, Swin, TrOCR). It is found that a promising direction for further research aimed at improving the accuracy of handwritten digit recognition is the development of integrated transformer-based systems in which the stages of preprocessing, detection, segmentation, and recognition are implemented within a unified and coordinated architecture.

Key words: optical character recognition, handwritten digit recognition, digitized documents of complex form, document understanding, transformer models, numerical region detection, symbol segmentation.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Надія Болюбаш, канд. пед. наук, доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: Nadiya.Bolubash@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2274-2422>.

Nadiia Boliubash, PhD in Education, Associate Professor at the Department of Intelligent Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Ukrainian. E-mail: Nadiya.Bolubash@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2274-2422>.

Ольга Яслик, студентка факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: olaasli3@gmail.com.

Olha Yaslyk, student at the Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Ukrainian. E-mail: olaasli3@gmail.com.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.04

Надія Болюбаши

KNOWLEDGE-BASED ПІДХІД ДО НАДАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ ІНВЕСТИЦІЙНИХ РІШЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТРАНСФОРМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

Розкрито knowledge-based підхід до багатокритеріального оцінювання інвестиційної привабливості фінансових активів із використанням моделей Temporal Fusion Transformer (TFT) та FinBERT, що базується на функції корисності для формування інвестиційних рекомендацій шляхом інтеграції прогнозованої дохідності, ризику та оцінок тональності фінансових новин. Запропонований механізм дозволяє формувати рекомендації щодо купівлі, утримання або продажу активів із урахуванням контексту інвестора та виступає концептуальною й архітектурною основою розробки рекомендаційної системи підтримки прийняття інвестиційних рішень.

Ключові слова: рекомендаційна система, фільтрація на основі знань, інвестиційні рішення, трансформерні моделі, багатовимірний часовий ряд, функція корисності, аналіз настроїв.

Рекомендаційні системи є ключовими компонентами сучасних інформаційних систем, що широко застосовуються в електронній комерції, медіасервісах, соціальних мережах та інших прикладних доменах. Їх основним призначенням є забезпечення персоналізованої фільтрації інформаційних потоків, зменшення інформаційного перевантаження та підвищення ефективності взаємодії користувача з інформаційними системами. Перспективним напрямом оптимізації бізнес-процесів у фінансовому секторі є інтеграція до онлайн сервісів рекомендаційних механізмів, що поєднують методи Deep Learning, обробки природної мови та багатокритеріального прийняття рішень.

Класичними підходами до формування рекомендацій є методи контентно-орієнтованої (content-based filtering), колаборативної (collaborative filtering) та гібридної фільтрації [1, 2]. Контентно-орієнтований підхід формує рекомендації на основі характеристик об'єктів та історії взаємодій користувача з ними. Колаборативна фільтрація здійснює прогнозування релевантності об'єктів на основі поведінки користувачів зі схожими вподобаннями. Окремо науковці виділяють також knowledge-based (rule-based) підходи, які ґрунтуються на використанні експліцитних знань про предметну область, обмежень та вимог користувача [3, 4]. Гібридні рекомендаційні системи поєднують сильні сторони кількох підходів, що дозволяє усунути окремі недоліки кожного з них і забезпечити кращу якість рекомендацій. Розвиток сучасних напрямів Data Mining, Machine Learning та Artificial Intelligence зумовив еволюцію підходів до формування рекомендацій – від класичних методів фільтрації інформації до складних гібридних, контекстно-орієнтованих, адаптивних та пояснювальних інтелектуальних рекомендаційних систем [5-9].

У фінансовому секторі рекомендаційні системи надають персоналізовані поради стосовно оптимізації інвестицій та управління ризиками. Сучасні фінансові ринки характеризуються високою динамічністю, значною волатильністю та залежністю від великої кількості взаємопов'язаних факторів, включаючи макроекономічні показники, ринкові очікування, інформаційний фон та поведінкові аспекти інвесторів. У таких умовах прийняття інвестиційних рішень є складною багатокритеріальною задачею, яка потребує врахування не лише історичних даних щодо цін активів, але й поточного контексту ринку, ризиків та інформаційних сигналів фінансових новин.

При наданні рекомендацій стосовно підтримки прийняття інвестиційних рішень застосування класичних підходів є обмеженим. Це обумовлено тим, що: відсутня достатня кількість відкритих даних про поведінку інвесторів; інвестиційні рішення мають індивідуальний характер та залежать від поточного стану ринку; фінансові дані мають високу динамічність і залежать від зовнішніх факторів. Сучасні підходи до моделювання поведінки акцій базуються на інтеграції декількох типів даних: історичні цінові ряди (OHLCV), технічні індикатори (RSI, MACD, Bollinger Bands, ATR, ковзні середні), макроекономічні показники, текстові дані

фінансових новин і повідомлень. Поведінка акцій розглядається як багатовимірна задача прогнозування часових рядів, де необхідно враховувати як внутрішню структуру даних, так і зовнішні фактори впливу. У цьому контексті ефективними є нейромережеві моделі Transformer-архітектури, здатні виявляти приховані залежності у даних без явного задання статистичної моделі [10]. Це обумовило вибір для фільтрації фінансової інформації knowledge-based підходу, який базується на використанні структурованих знань про фінансові активи та ринкові умови.

Метою роботи є розробка knowledge-based підходу до підтримки прийняття інвестиційних рішень на основі трансформерних моделей прогнозування фінансових часових рядів та аналізу фінансових новин. Такий підхід дозволяє інтегрувати результати моделей прогнозування багатовимірних часових рядів, оцінки ризику та аналізу новинного фону, забезпечуючи багатокритеріальну підтримку інвестиційних рішень. Він має низку переваг у задачах фінансової аналітики, оскільки дозволяє: уникнути проблеми «холодного старту», забезпечити пояснюваність рекомендацій, інтегрувати результати прогнозних моделей фінансових часових рядів та аналізу текстової інформації, адаптувати рекомендації до індивідуальних потреб інвестора.

Формування рекомендацій щодо інвестиційних рішень здійснюється шляхом апроксимації функції корисності:

$$f(i, t, c) : I \times T \times C \rightarrow \mathcal{R}, \quad (1)$$

де: $I = \{i_k \mid k = 1, \dots, n\}$ – множина фінансових активів (акцій компаній);

$T = \{t_s \mid s = 1, \dots, \tau\}$ – множина моментів часу (торгові дні);

C – множина контекстів, що включає параметри інвестора (схильність до ризику, інвестиційний горизонт, доступний капітал, ресурсні обмеження);

$\mathcal{R}$ – впорядкований числовий простір значень корисності, заданий на множині дійсних чисел ($\mathcal{R} \subseteq \mathbb{R}$).

Значення функції корисності $f(i_k, t_s, c)$ інтерпретується як інтегральна оцінка інвестиційної привабливості активу i_k у момент часу t_s із урахуванням контексту c .

Функція корисності визначається як агрегована оцінка ключових факторів:

$$f(i, t, c) = w_1 \cdot \hat{r}_i - w_2 \cdot \sigma_{i,t} + w_3 \cdot s_{i,t}, \quad (2)$$

де: $\hat{r}_i$ – прогнозована дохідність i -го активу; $\sigma_{i,t}$ – оцінка ризику i -го активу;

$s_{i,t}$ – показник ринкових настроїв (sentiment) стосовно i -го активу, $s_{i,t} \in [-1; 1]$:

$s_{i,t} = -1$ – негативний новинний фон, $s_{i,t} = 0$ – нейтральний фон, $s_{i,t} = 1$ – позитивний фон;

w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$), що відображають відносну важливість відповідних факторів: w_1 – дохідності, w_2 – ризику та w_3 – тональності новинного фону.

Контекст c дозволяє адаптувати рекомендації до індивідуального профілю інвестора, зокрема через динамічне коригування вагових коефіцієнтів функції корисності (наприклад, більша вага ризику для консервативних стратегій).

Прогнозування дохідності активів здійснюється з використанням моделі Temporal Fusion Transformer (TFT), яка належить до сучасного класу трансформерних архітектур для аналізу часових рядів [10]. Використання TFT зумовлено такими її перевагами: 1) здатністю працювати з багатовимірними часовими рядами (ціновими рядами ринкових OHLCV-даних та технічними індикаторами); 2) урахуванням довгострокових та короткострокових залежностей; 3) можливістю інтеграції часових та статичних ознак; 4) наявністю механізмів інтерпретації впливу ознак; 5) можливістю автоматично оцінювати важливість окремих факторів у різні моменти часу за рахунок механізму feature selection / variable selection. На відміну від класичних рекурентних нейронних мереж типу LSTM, модель TFT використовує механізм attention, що дозволяє адаптивно визначати важливість попередніх часових залежностей під час прогнозування.

Аналіз фінансових новин здійснюють за допомогою моделі обробки природної мови на основі архітектури Transformer сімейства BERT – FinBERT, яка є попередньо навченою та адаптованою до фінансової предметної області і спеціалізується на розв'язанні задач sentiment analysis фінансових текстів, аналізу ринкових настроїв та підтримки інвестиційних рішень [11]. Використання цієї моделі дозволяє оцінювати тональність фінансових новин і враховувати потенційний вплив інформаційного фону на очікувану поведінку активів, включаючи відповідний фактор у процес формування рекомендацій.

Прогнозовану дохідність акції i -го активу рахують за формулою:

$$\hat{r}_i = \frac{\hat{p}_{i,t+1} - p_{i,t}}{p_{i,t}}, \quad (3)$$

де: $p_{i,t}$ – поточна ціна акції; $\hat{p}_{i,t+1}$ – прогнозна ціна акції, отримана з допомогою TFT моделі по часовому ряду історичних даних курсу акцій з урахуванням технічних індикаторів.

Позитивні значення прогнозованої дохідності вказують на потенційне зростання активу, тоді як від'ємні – на можливе зниження його вартості.

Ризик є мірою нестабільності, яку розраховують за даними часового ряду з цінами акцій i -го активу як стандартне відхилення дохідностей:

$$\sigma_{i,t} = \sigma(r_i). \quad (4)$$

Розрахунок ризику активу виконується на основі ковзного часового вікна, що дозволяє оцінити поточний рівень його волатильності. Чим більше значення стандартного відхилення, тим вищою є ризиковість інвестицій.

Новинний фон $s_{i,t}$ є оцінкою настрою новин стосовно i -го активу із використанням NLP-моделі, яка для кожної акції (компанії, акціонерів тощо) видає усереднене за день значення оцінок тональності новин, формуючи часовий ряд денних значень тональності (daily sentiment time series):

$$s_{i,t} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j, \quad (5)$$

де: N – кількість новин для i -го активу за день.

Sentiment-компонента функції корисності дозволяє врахувати поведінкові фактори учасників ринку та інформаційний фон, які можуть бути не повністю відображені часовими рядами цін та технічних індикаторів.

Перед обчисленням функції корисності всі складові нормалізуються до числового діапазону $[0, 1]$, для забезпечення їх коректної інтеграції.

Описаний підхід реалізує багатокритеріальну оцінку інвестиційної привабливості активів на основі лінійної згортки критеріїв (дохідність, ризик, інформаційний фон), що дозволяє отримати інтегральний показник для подальшого ранжування. На основі значень функції корисності формуються торгові сигнали: buy (купити): високі значення; hold (утримувати): середні значення; sell (продати): низькі значення. У інвестора є можливість впливати на розподіл активів між класами рекомендацій, задаючи порогові значення для цих сигналів (наприклад: $f(i, t, c) > 0,7$ – buy, $f(i, t, c) < 0,4$ – sell).

Отримані значення функції корисності активів ранжують у порядку спадання та використовують для отримання рекомендацій стосовно ринкової поведінки активів та формування портфеля інвестора. На відміну від задачі аналізу окремого активу, у випадку інвестиційного портфеля необхідно враховувати не лише індивідуальні характеристики кожної акції, але й взаємозв'язки між активами, ефект диверсифікації та ресурсні обмеження інвестора.

У запропонованому knowledge-based підході формування портфеля здійснюється шляхом відбору активів із врахуванням значень функції корисності. Нехай A множина A активів, відібраних до портфеля:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}, \quad (6)$$

де: a_i – i -й актив, m – кількість активів у портфелі.

Відбір здійснюється шляхом ранжування активів за значенням функції корисності та вибору активів із найвищими значеннями. Під час формування портфеля у межах запропонованого підходу інвестор може задавати параметри інвестиційної стратегії, що визначають контекст c та впливають на результати ранжування: інвестиційний горизонт, рівень схильності до ризику, стартовий капітал, допустима просадка та максимальна частка окремого активу.

Дохідність портфеля R_p розраховують як зважену суму прогнозованих дохідностей усіх активів:

$$R_p = \sum_{j=1}^m w_i \hat{r}_j. \quad (8)$$

де: $\hat{r}_i$ – прогнозована дохідність i -го активу; w_i – вага i -го активу у портфелі ($\sum w_i = 1$).

Вагові коефіцієнти активів у портфелі визначають частку інвестицій, що припадає на кожну акцію, пропорційно прогнозованій дохідності:

$$w_i = \frac{\hat{r}_i}{\sum_{j=1}^m \hat{r}_j}. \quad (9)$$

Такий підхід орієнтований на максимізацію очікуваного прибутку і дозволяє одночасно враховувати очікувану дохідність, ризиковість та інформаційний фон.

Важливою складовою процесу підтримки прийняття інвестиційних рішень є оцінка ризику портфеля, яку розраховують за формулою:

$$\sigma_p = \sqrt{w^T \Sigma w}, \quad (10)$$

де: $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ – вектор ваг акцій усіх активів у портфелі, w^T – транспонований вектор; Σ – коваріаційна матриця дохідностей.

Коваріаційна матриця дохідностей формується на основі історичних значень дохідностей активів та відображає не лише індивідуальну варіативність кожного активу, але й взаємозв'язки між ними. Це дозволяє врахувати ефект диверсифікації.

Для оцінки ефективності торгової стратегії з урахуванням ризику використовується коефіцієнт Шарпа (спрощений варіант), який показує співвідношення середньої надлишкової дохідності до її волатильності:

$$S = \frac{R_p}{\sigma_p}, \quad (11)$$

де: R_p – дохідність портфеля; σ_p – стандартне відхилення дохідності портфеля.

Розраховані значення S інтерпретують наступним чином: < 1 : погано, $0-1$: слабо, $1-2$: добре (прийнятний рівень), $2-3$: дуже добре, > 3 : відмінно (рідко, висока ефективність).

Запропонований knowledge-based підхід дозволяє реалізувати рекомендаційну систему підтримки інвестиційних рішень, архітектура якої передбачає інтеграцію модулів прогнозування, sentiment analysis, оцінювання ризику та формування рекомендацій. Така система забезпечує багатокритеріальну оцінку фінансових активів із урахуванням дохідності, ризику, інформаційного фону та індивідуального профілю інвестора, що дозволяє підвищити узгодженість рекомендацій із характеристиками ринкового середовища та інвестиційними цілями користувача. Перспективами подальших досліджень є використання багатокрокового прогнозування, динамічна адаптація ваг функцій корисності та оптимізації портфеля в режимі реального часу.

References

1. Falk K. Practical recommender systems. Shelter Island, NY: Manning, 2019. 432 p.
2. Padti P.G., Hegde K., Kumar P. Hybrid Movie Recommender System. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*. 2021, vol. 4, no. 7, pp. 311–314.
3. Uta M, Felfernig A, Le V-M, Tran TNT, Garber D, Lubos S., Burgstaller T. Knowledge-based recommender systems: overview and research directions. *Frontiers in Big Data*. 2024, vol 7, P. 1304439. URL: <https://doi.org/10.3389/fdata.2024.1304439>
4. Boliubash N., Khodzitskyi O. Dynamic updating of association rules in intelligent e-commerce recommendation systems. *Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal*. 2025, vol. 35, no 1, pp. 55-64. URL: <https://doi.org/10.47451/inn2025-01-02>
5. Ko H., Lee S., Park Y., Choi A. A Survey of Recommendation Systems: Recommendation Models, Techniques, and Application Fields. *Electronics*. 2022, vol 11, no 1, 141. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics11010141>
6. Roy D., Dutta M. A systematic review and research perspective on recommender systems. *Journal of Big Data*. 2022, vol. 9, 59. URL: <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00592-5>
7. Болубаш Н.М., Желтобрюхов О.І. Чат-бот для надання рекомендацій із перегляду відеофільмів на основі матричних факторизаційних моделей. *Інформаційні технології та суспільство*. 2024, № 1 (12), с. 20-30. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.1.3>
8. Zhang Q., Lu J., Jin Y. Artificial intelligence in recommender systems. *Complex & Intelligent Systems*. 2021, vol. 7, pp. 439-457. URL: <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00212-w>
9. Boliubash N.M. Increasing the efficiency of psychological support in crisis situations using an information system based on generative artificial intelligence. *German International Journal of Modern Science*. 2026, № 124, pp. 84-92. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19195814>
10. Lim B., Arik S., Loeff N., Pfister T. Temporal Fusion Transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting. *International Journal of Forecasting*. 2021, vol. 37, pp. 1748-1764. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.03.012>
11. Huang Y., Yang C. Enhancing stock price forecasting with a modular deep learning framework incorporating plug-and-play transformer variants. *Expert Systems with Applications*. 2026, vol. 315, P. 131572. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.131572>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.04

Nadiia Boliubash

KNOWLEDGE-BASED APPROACH TO PROVIDING RECOMMENDATIONS FOR MAKING INVESTMENT DECISIONS USING TRANSFORMER MODELS

A knowledge-based approach to the multicriteria evaluation of the investment attractiveness of financial assets using Temporal Fusion Transformer and FinBERT models is presented. The approach is based on a utility function for generating investment recommendations through the integration of predicted returns, risk indicators, and financial news sentiment scores. The proposed mechanism enables the generation of buy, hold, or sell recommendations while

considering investor context and serves as a conceptual and architectural foundation for the development of a recommendation system for investment decision support.

Key words: *recommendation system, knowledge-based filtering, investment decisions, transformer models, multivariate time series, utility function, sentiment analysis.*

Відомості про автора / Information about the Author

Надія Болюбаш, канд. пед. наук, доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: Nadiya.Bolubash@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2274-2422>.

Nadiia Boliubash, PhD in Education, Associate Professor at the Department of Intelligent Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Ukrainian. E-mail: Nadiya.Bolubash@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2274-2422>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.05

Стефанія Бондаренко

SELF-HEALING ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Тези представляють теоретико-методологічний аналіз впровадження технологій самовідновлення (self-healing) як вирішального чинника подолання кризи супроводження автоматизованого тестування в умовах сучасних циклів розробки програмного забезпечення. Self-healing тестування розглядається як інструмент модернізації процесів забезпечення якості, що базується на переході від жорсткої детермінації об'єктів до інтелектуальної адаптації тестових сценаріїв у реальному часі. Розглядається технологічний фундамент рішення, що поєднує алгоритми машинного навчання, комп'ютерного зору та семантичного аналізу DOM-структур.

Наголошується, що інтеграція механізмів самовідновлення в інженерний стек дозволяє мінімізувати витрати на підтримку скриптів та підвищити стабільність конвеєрів безперервної інтеграції (CI/CD). Проведено порівняльний аналіз традиційної автоматизації та інтелектуальних систем тестування, виявлено ключові ризики, зокрема проблему «маскування» дефектів. Окреслено перспективи трансформації ролі інженера з автоматизації у архітектора інтелектуальних систем та перехід до концепції предиктивного тестування на основі автономних агентивних моделей.

Ключові слова: автоматизація тестування програмного забезпечення, якість програмного забезпечення, self-healing тестування, машинне навчання, CI/CD, крихкість тестів, комп'ютерний зір, інтелектуальні системи, предиктивний аналіз.

Еволюція методологій розробки програмного забезпечення у бік CI/CD створила парадоксальну ситуацію, коли традиційна автоматизація тестування, замість прискорення процесів, дедалі частіше перетворюється на їхнє гальмо. Ключова проблема тут полягає у феномені високої структурної вразливості тестових сценаріїв, що в академічній та інженерній спільноті класифікується як «test fragility» (або «крихкість тестів») [1]. Сучасні вебзастосунки, побудовані на фреймворках на кшталт React чи Angular, є достатньо динамічними. Постійна регенерація контенту та часті зміни в ієрархії DOM-дерева призводять до того, що детерміновані методи ідентифікації об'єктів через жорсткі селектори (XPath, CSS) стають неактуальними майже миттєво після найменших змін у front-end коді.

Як показує практика, витрати на підтримку таких автотестів можуть поглинати до половини всього бюджету на забезпечення якості. Це формує так звану «піраміду технічного боргу», коли інженерні команди стикаються з критичним зростанням навантаження, оскільки значна частина робочого часу витрачається не на розширення тестового покриття чи пошук складних логічних дефектів, а на рутинну актуалізацію зламаних локаторів. Така неефективність ставить під сумнів саму доцільність повної автоматизації в умовах швидких ітерацій розробки. Чому і виникає гостра потреба в інтелектуальних механізмах, що здатні до автономної адаптації в середовищі, яке постійно змінюється [2].

Відповіддю на цей виклик стала парадигма self-healing, що базується на зміщенні від імперативного пошуку елементів до декларативного аналізу стану інтерфейсу. Науковою основою цього підходу є використання мультивекторної ідентифікації об'єктів, де кожен елемент DOM (Document Object Model) описується не одним локатором, а цілісним «цифровим відбитком». Такий відбиток включає десятки параметрів – від просторового положення до семантичних маркерів та візуальних характеристик [3]. Технологічно рішення спирається на алгоритми машинного навчання (англ. Machine Learning, ML), зокрема на навчання з учителем для класифікації елементів та методи кластеризації для виявлення схожості між об'єктами в різних версіях застосунка. Важливим компонентом є побудова динамічного графа станів, де вузли представляють елементи інтерфейсу, а ребра – їхні взаємозв'язки. Це дозволяє системі застосовувати методи просторового аналізу, якщо об'єкт було «втрачено» через зміну структури сторінки [4].

Практична реалізація концепції self-healing базується на трьох функціональних механізмах: системному зборі атрибутивних даних під час успішних ітерацій тестування, евристичному порівнянні об'єктів у разі виникнення помилок та автоматичній актуалізації об'єктного репозиторію. У ситуації, коли стандартний селектор не

ідентифікує цільовий елемент, алгоритм ініціює розрахунок коефіцієнтів подібності для всіх потенційних кандидатів у поточному стані DOM. Для цього застосовуються метрики аналізу текстової та структурної близькості, зокрема відстань Левенштейна або косинусна схожість векторів ознак [3]. Якщо знайдений об'єкт відповідає встановленому порогу впевненості (confidence threshold), система здійснює динамічну підміну локатора в режимі реального часу, що забезпечує безперервність виконання тестового сценарію. Додатково сучасні рішення інтегрують інструменти комп'ютерного зору (Computer Vision) для верифікації візуальної автентичності елементів. Це дозволяє нівелювати вплив змін у кодї, які не призводять до деградації користувацького досвіду або візуальної ідентичності інтерфейсу [4]. Такий багаторівневий аналіз трансформує процес тестування з лінійного детермінованого алгоритму в інтелектуальну адаптивну систему, здатну до самонавчання на основі накопиченого досвіду взаємодії із застосунком.

Впровадження механізмів самовідновлення в інженерний стек суттєво коригує показники повернення інвестицій в автоматизацію, проте цей процес супроводжується специфічними ризиками, що потребують ретельного наукового оцінювання. Головною перевагою технології є радикальне скорочення частоти помилок, обумовлених структурним рефакторингом фронтенд-частини. Це дозволяє забезпечити високу стабільність конвеєрів CI/CD: замість блокування циклу розгортання через зміну атрибутів (наприклад, динамічного ID), система адаптується, підтримуючи безперервність зворотного зв'язку. Однак, з погляду надійності, виникає критична проблема маскування дефектів. Існує імовірність, що алгоритм помилково інтерпретує регресійну помилку – таку як некоректне зміщення функціонального блоку – як валідну зміну та виконає автокорекцію, фактично допускаючи потрапляння дефекту в релізну збірку [5]. Для об'єктивного аналізу доцільності впровадження self-healing рішень необхідно розглянути порівняльні характеристики традиційного та адаптивного підходів (табл. 1).

Таблиці 1.

Порівняльна характеристика впливу на процес тестування

Параметр порівняння	Традиційна автоматизація	Self-healing тестування
Реакція на зміну DOM	Негайний збій сценарію	Автономна адаптація в runtime
Витрати на підтримку	Високі, прямо пропорційні змінам	Низькі, мінімізуються за рахунок ML
Точність	Абсолютна (детермінована)	Ймовірнісна (залежить від порогових значень)
Ризик пропуску дефектів	Мінімальний (тест «чесний»)	Середній (ризик false healing)
Вимоги до інфраструктури (або\та ресурсів)	Стандартні фреймворки (Selenium, Playwright)	Необхідність обчислювальних ресурсів для ML

Варто зауважити, що окрім уже згаданого ризику «помилкового лікування», вагомим деструктивним чинником залишається «ефект чорної скриньки». Він полягає у тому, що інженерам буває вкрай складно інтерпретувати внутрішню логіку, за якою система дійшла висновку про ідентичність тих чи інших об'єктів. Якщо порогові значення впевненості (confidence thresholds) виставлені некоректно, це неминуче призводить до деградації довіри до загальних результатів тестування. Проте при зваженому професійному підході, коли самовідновлення підкріплюється детальним логуванням та обов'язковою верифікацією змін інженером у режимі пост-фактум, ці недоліки вдається нівелювати. У такому разі технологія перетворюється на справді ефективний інструмент стабілізації масштабних тестових наборів.

Майбутній розвиток технологій самовідновлення в тестуванні програмного забезпечення (ПЗ) ми вбачаємо у поступовому переході від реактивних моделей, які спрацьовують лише в момент збою, до проактивних систем інтелектуального передбачення [5]. Сьогодні перспективним напрямом вважається концепція «предиктивного тестування». У межах цього підходу алгоритми аналізують правки у вихідному кодї ще до моменту компіляції та автоматично генерують пропозиції щодо оновлення тестових сценаріїв у репозиторії. Така архітектура базується на глибокій інтеграції з системами контролю версій (VCS) та використанні LLM-моделей для розпізнавання семантичних зв'язків між змінами у бізнес-логіці та відповідними елементами інтерфейсу. Фактично це дозволяє повністю усунути затримку на підтримку тестів, роблячи процеси розробки та верифікації синхронними.

Іншим стратегічним вектором виступає розробка автономних тестових агентів. Їхня роль не обмежується відновленням локаторів; вони здатні самостійно добудовувати тестові сценарії у відповідь на впровадження нової функціональності. Реалізація таких агентів стає можливою завдяки посиленню ролі навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning), де агент «досліджує» застосунок, самостійно ідентифікує зміни в користувацьких шляхах та адаптує граф переходів без прямої участі людини [6]. Паралельно з цим наукові зусилля зосереджуються на стандартизації «метаданих» об'єктів інтерфейсу. Це дозволило б різним інструментам обмінюватися знаннями про структуру застосунків, що значно підвищить загальну точність прогнозів.

Фундаментальна зміна парадигми, яку несе в собі self-healing, неминуче трансформує і професійний профіль QA-інженера. Фахівець перетворюється з простого виконавця технічних сценаріїв на архітектора інтелектуальних екосистем тестування. У цій новій системі координат фокус зміщується з імперативного написання коду на стратегічне управління життєвим циклом моделей штучного інтелекту. Ключовими завданнями стають підготовка та валідація високоякісних навчальних вибірок, адже саме від якості та репрезентативності даних залежить здатність системи до коректного самовідновлення. Більше того, інженер бере на себе роль контролера ризиків: він встановлює межі автономності алгоритмів та наглядає за етичними аспектами прийняття рішень ШІ. Це критично важливо, щоб запобігти ситуаціям, коли система може «залікувати» дефект, що має вирішальне значення для безпеки користувача.

Така еволюція професії готує ґрунт для остаточного переходу від автоматизованого до повністю автономного тестування. Йдеться про створення середовищ, здатних до самоорганізації, прогнозування вразливостей та безперервного вдосконалення без втручання оператора. Це стає критичним фактором при розробці систем наступного покоління, де відповідальність за помилку є гранично високою – наприклад, у сфері безпілотного транспорту чи медичних платформ діагностики з використанням штучного інтелекту. У подібних контекстах традиційні методи тестування виявляються занадто інертними. Тому концепція self-healing – це лише перший етап глобальної трансформації галузі. Вона свідчить про перетворення забезпечення якості з дискретного процесу перевірки коду в цілісну інтелектуальну систему, яка органічно розвивається разом із цифровим світом, гарантуючи високий рівень надійності складних програмних комплексів.

References

1. Prospects of using ai for automated software TESTING / A. Antonenko et al. *Technologies and Engineering*. 2025. Vol. 26, no. 5. P. 9–20. URL: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2025.5.1> (date of access: 25.04.2026).
2. Garousi V., Mäntylä M. V. When and what to automate in software testing? A multi-vocal literature review. *Information and Software Technology*. 2016. Vol. 76. P. 92–117. URL: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2016.04.015> (date of access: 25.04.2026).
3. Visual vs. DOM-Based Web Locators: An Empirical Study / M. Leotta et al. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham, 2014. P. 322–340. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-08245-5_19 (date of access: 25.04.2026).
4. Automating test automation / S. Thummalapenta et al. *2012 34th International Conference on Software Engineering (ICSE 2012)*, Zurich, 2–9 June 2012. 2012. URL: <https://doi.org/10.1109/icse.2012.6227131> (date of access: 25.04.2026).
5. Automated generation of visual web tests from DOM-based web tests / M. Leotta et al. *SAC 2015: Symposium on Applied Computing*, Salamanca Spain. New York, NY, USA, 2015. URL: <https://doi.org/10.1145/2695664.2695847> (date of access: 25.04.2026).
6. Ma S., Xiao X., Ye Y. Agent+P: Guiding UI Agents via Symbolic Planning. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2510.06042 (date of access: 26.04.2026).

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.05

Stefaniia Bondarenko

SELF-HEALING SOFTWARE TESTING

The theses present a theoretical and methodological analysis of the implementation of self-healing technologies as a decisive factor in overcoming the crisis of automated testing support in the conditions of modern software development cycles. Self-healing testing is considered as a tool for modernizing quality assurance processes, based on the transition from rigid object determination to intelligent adaptation of test scenarios in real time. The technological foundation of the solution is considered, combining machine learning algorithms, computer vision and semantic analysis of DOM structures. It is emphasized that the integration of self-healing mechanisms into the engineering stack allows minimizing the costs of supporting scripts and increasing the stability of continuous integration pipelines (CI/CD). A comparative analysis of traditional automation and intelligent testing systems is conducted, key risks are identified, in particular the problem of "masking" defects. The prospects for transforming the role of an automation engineer into an architect of intelligent systems and the transition to the concept of predictive testing based on autonomous agentive models are outlined.

Key words: software testing automation, software quality, self-healing testing, machine learning (ML), CI/CD, test fragility, computer vision, intelligent systems, predictive analysis.

Відомості про автора / Information about the Author

Стефанія Бондаренко, викладачка кафедри інженерії програмного забезпечення, факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: bondarenko.stefania@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0007-8767-1032>.

Stefania Bondarenko, lecturer, department of software engineering, faculty of computer science,, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: bondarenko.stefania@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0007-8767-1032>.

© С. Бондаренко

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.06

Оксана Бразінець

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ГРАФІЧНОГО МЕТОДУ ТА МЕТОДУ ДИХОТОМІЇ ДЛЯ НЕЛІНІЙНИХ РІВНЯНЬ У MAPLE

В тезах розглянуто практичне застосування класичних методів розв'язування нелінійних рівнянь із використанням системи комп'ютерної математики Maple. Особливу увагу приділено графічному методу відокремлення коренів, що дозволяє наочно визначити інтервали їх існування та забезпечує початкову інформацію для подальших обчислень. Додатково описано метод дихотомії (половинного поділу), який є одним із найпростіших і водночас надійних алгоритмів уточнення коренів. Метод дихотомії гарантує збіжність для будь-якої неперервної функції зі зміною знаку на кінцях інтервалу, що робить його універсальним, хоча й повільнішим. Наведено приклади реалізації зазначених методів у Maple, що демонструють ефективність програмного середовища для навчальних і дослідницьких цілей. Показано переваги використання Maple для візуалізації функцій, автоматизації обчислень та перевірки результатів. Практичне застосування цих методів сприяє формуванню навичок аналізу нелінійних задач, розвитку алгоритмічного мислення та підвищенню якості підготовки студентів у галузі прикладної математики. Дослідження підкреслює важливість інтеграції сучасних програмних засобів у навчальний процес та наукові розробки.

Ключові слова: нелінійні рівняння, метод дихотомії, графічний метод, Maple, чисельні методи.

Нелінійні рівняння відіграють ключову роль у сучасному математичному моделюванні, оскільки саме вони описують більшість реальних фізичних, технічних, біологічних та економічних процесів. На відміну від лінійних моделей, нелінійні залежності дозволяють відтворювати складні явища – від коливальних систем і хімічної кінетики до задач оптимізації та динаміки популяцій. Проте їхня аналітична розв'язність є винятком, а не правилом: у загальному випадку точний розв'язок або не існує, або має надто складний вигляд для практичного використання. Саме тому чисельні методи стають основним інструментом для знаходження коренів нелінійних рівнянь.

Основні труднощі розв'язування нелінійних рівнянь чисельними методами:

- відсутність універсального методу, який би гарантував розв'язок для всіх типів нелінійних рівнянь;
- залежність збіжності методів від вибору початкового наближення;
- необхідність контролю похибки та оцінки точності результатів;
- потреба у візуалізації процесу збіжності та аналізу поведінки функції.

Сучасні комп'ютерні математичні системи значно спрощують застосування чисельних алгоритмів, забезпечуючи високу точність, автоматизацію обчислень та можливість візуального аналізу. Одним із найпотужніших середовищ такого типу є Maple, який поєднує символічні та чисельні методи, підтримує широкий спектр алгоритмів для розв'язування нелінійних рівнянь і надає інструменти для аналізу збіжності, графічної інтерпретації та програмної реалізації власних методів. Такий підхід дозволяє показати практичну цінність Maple для ефективного навчання, досліджень та практичного застосування у різних галузях.

Практичні аспекти використання Maple для розв'язування систем нелінійних рівнянь розглянуто у дослідженні [1].

В [2] розглянуто застосування математичного пакету Maple до розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь прямими чисельними методами. На прикладі програмного пакету Maple в [3] показано не тільки отримання чисельного розв'язку, а і його візуалізація у вигляді графіків, поверхонь, що допомагає в розумінні поведінки розв'язку та впливу різних крайових умов.

Розглядається рівняння вигляду:

$$f(x) = 0, \quad (1)$$

де $f(x)$ – нелінійна неперервна функція однієї змінної, тобто $f: R^1 \rightarrow R^1$.

У загальному випадку рівняння (1) може мати багато коренів. Чисельні методи розв'язання нелінійних рівнянь, які розглянуто далі, дозволяють знаходити один корінь на заданому відрізку $[a, b]$. При цьому на інтервалі повинен існувати тільки один корінь. Знайти відрізок, що задовольняє цю умову можна різними способами:

- з фізичних міркувань, тобто на основі фізичних знань про задачу;
- на основі досвіду розв'язання аналогічних задач;
- за допомогою графічних методів;
- шляхом відокремлення коренів.

Якщо функція $f(x)$ заздалегідь відома, то найбільш ефективним є графічний спосіб пошуку відрізка $[a, b]$. В інших випадках, коли відрізок $[a, b]$ треба знайти автоматично (не візуально), то застосовують алгоритм відокремлення коренів.

В чисельних методах рівняння вважається розв'язаним, якщо всі корені знайдені з заданою точністю, тобто з наперед заданою похибкою. Знаходження наближених коренів рівняння звичайно складається з двох етапів:

- відокремлення коренів, тобто знаходження для кожного з них відрізка ізоляції;
- обчислення кореня у відрізку ізоляції з наперед заданою точністю.

Графічний метод. Графічний метод відокремлення кореня полягає у попередньому аналізі поведінки функції $f(x)$ на певному інтервалі з метою визначення ділянок, на яких функція змінює знак, а отже – гарантовано має корінь. Цей метод не дає точного значення кореня, але забезпечує початкову інформацію, необхідну для подальшого застосування чисельних методів (методу Ньютона, січних, простої ітерації тощо).

Ідея методу полягає в тому, що якщо функція неперервна на відрізку $[a, b]$ і виконується умова

$$f(a) \cdot f(b) < 0,$$

то, згідно з теоремою Больцано, на цьому відрізку існує принаймні один корінь рівняння (1). Графічний метод дозволяє візуально знайти такі відрізки, тобто побачити, де крива перетинає вісь Ox .

Переваги графічного способу:

- дозволяє гарантовано знайти відрізок, де є корінь;
- допомагає уникнути помилок при виборі початкових наближень;
- дає змогу виявити усі корені на заданому проміжку;
- забезпечує наочність і інтуїтивне розуміння поведінки функції;
- є універсальним і застосовується до будь-яких неперервних функцій.

Розглянемо реалізацію цього методу у Maple на прикладі рівняння

$$x^2 - 2 + e^{-x} = 0. \quad (2)$$

Задаємо функцію та будуємо її графік (рис.1). Графік показує два перетини з віссю Ox на проміжках $[-1, 0]$ та $[1, 2]$, тобто рівняння має два корені. У Maple команда **fsolve** призначена для чисельного розв'язування рівнянь та систем рівнянь. На відміну від **solve**, яка шукає аналітичний розв'язок, **fsolve** повертає наближене числове значення кореня. Ця команда може знаходити один корінь за один виклик, використовуючи внутрішні алгоритми (модифікований Ньютона, комбіновані методи), тому важливо задавати інтервал, на якому треба відшукати розв'язок, якщо рівняння має не один корінь.

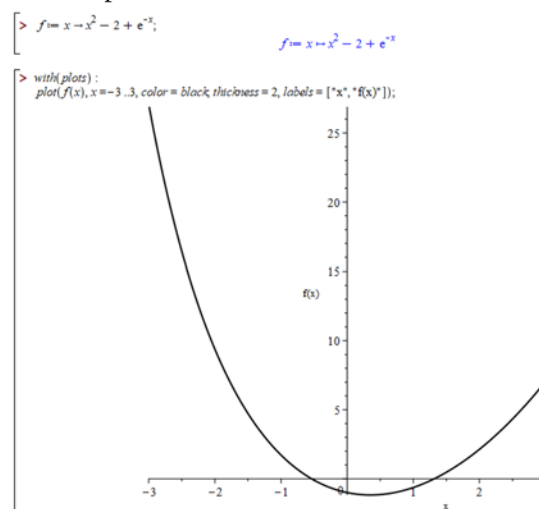


Рис. 1. Графічне відокремлення коренів рівняння (2) у Maple.

Оскільки рівняння (2) має два корені, тому використовуємо два виклики:

```
> x1 := fsolve(f(x), x = -1..0);
    x2 := fsolve(f(x), x = 1..2);
x1 := -0.5372744492
x2 := 1.315973778
```

Використання інтервалів, отриманих графічним методом, забезпечує стабільність та точність чисельного розв'язання. Далі продемонструємо застосування чотирьох класичних методів для знаходження коренів на цих інтервалах.

Метод дихотомії (бісекції). Метод дихотомії ще називають методом половинного поділу. При розв'язанні нелінійного рівняння методом половинного поділу задаються відрізок $[a, b]$, на якому існує лише один розв'язок, і бажана точність $\varepsilon > 0$ розв'язання задачі. Він ґрунтується на послідовному діленні відрізка навпіл. Якщо на кінцях відрізка функція має різні знаки, то корінь міститься в одній із половин. Повторюємо, доки довжина інтервалу не стане меншою за задану похибку.

Метод дихотомії в Maple можна реалізувати двома способами:

- власна реалізація, тобто написання процедури, яка крок за кроком виконує алгоритм ітерацій, що корисно для навчання та демонстрації принципу роботи методу;
- використання готової функції **Bisection** з пакета **Student[NumericalAnalysis]**, що дозволяє швидко отримати результат із заданою точністю.

Покажемо обидва варіанти. Власна реалізація представлена на рис.2.

На кожному кроці надруковано номер ітерації, ліва межа a , права межа b , середина інтервалу c , значення $f(c)$. Наприкінці виводить наближене значення кореня. Такий варіант гарно ілюструє збіжність методу бісекції. Ми бачимо як інтервал звужується, а середина поступово сходиться до кореня.

Переваги вбудованої команди в тому, що не потрібно писати власний код, а достатньо викликати готову функцію, можна легко змінювати параметри точності та інтервал, Maple автоматично контролює похибку та кількість ітерацій. Результат може бути виведений в різному вигляді: тільки корінь або повна таблиця збіжності, або графічна візуалізація, що продемонстровано на рис.3.

```
> f := x - x^2 - 2 + exp(-x);
a := -1.0;
b := 0.0;
tol := 10^-5;
iter := 0;

while (b - a) > tol do
    iter := iter + 1;
    c := (a + b) / 2;
    printf("Ітерація %d: a = %.6f, b = %.6f, c = %.6f, f(c) = %.6fn",
        iter, a, b, c, f(c));
    if f(a) * f(c) < 0 then
        b := c;
    else
        a := c;
    end if;
end do;

printf("Наближений корінь 1: x1 = %.5fn", c);

f := x - x^2 - 2 + exp(-x);
a := 1.0;
b := 2.0;
tol := 10^-5;
iter := 0;

while (b - a) > tol do
    iter := iter + 1;
    c := (a + b) / 2;
    printf("Ітерація %d: a = %.6f, b = %.6f, c = %.6f, f(c) = %.6fn",
        iter, a, b, c, f(c));
    if f(a) * f(c) < 0 then
        b := c;
    else
        a := c;
    end if;
end do;

printf("Наближений корінь 2: x2 = %.5fn", c);

f := x - x^2 - 2 + exp(-x);
a := 1.0;
b := 2.0;
tol := 1/100000;

Ітерація 1: a = -1.000000, b = 0.000000, c = -0.500000, f(c) = -0.101279
Ітерація 2: a = -1.000000, b = -0.500000, c = -0.750000, f(c) = 0.679500
Ітерація 3: a = -0.750000, b = -0.500000, c = -0.625000, f(c) = -0.258871
Ітерація 4: a = -0.625000, b = -0.500000, c = -0.562500, f(c) = 0.071461
Ітерація 5: a = -0.562500, b = -0.500000, c = -0.531250, f(c) = -0.016716
Ітерація 6: a = -0.562500, b = -0.531250, c = -0.546875, f(c) = 0.026917
Ітерація 7: a = -0.546875, b = -0.531250, c = -0.539062, f(c) = 0.004587
Ітерація 8: a = -0.539062, b = -0.531250, c = -0.535156, f(c) = -0.005893
Ітерація 9: a = -0.539062, b = -0.535156, c = -0.537109, f(c) = -0.000460
Ітерація 10: a = -0.539062, b = -0.537109, c = -0.538086, f(c) = 0.002262
Ітерація 11: a = -0.538086, b = -0.537109, c = -0.537598, f(c) = 0.000901
Ітерація 12: a = -0.537598, b = -0.537109, c = -0.537354, f(c) = 0.000220
Ітерація 13: a = -0.537354, b = -0.537109, c = -0.537231, f(c) = -0.000120
Ітерація 14: a = -0.537354, b = -0.537231, c = -0.537292, f(c) = 0.000050
Ітерація 15: a = -0.537292, b = -0.537231, c = -0.537262, f(c) = -0.000035
Ітерація 16: a = -0.537292, b = -0.537262, c = -0.537277, f(c) = 0.000008
Ітерація 17: a = -0.537277, b = -0.537262, c = -0.537270, f(c) = -0.000014
Наближений корінь 1: x1 = -0.53727

Ітерація 1: a = 1.000000, b = 2.000000, c = 1.500000, f(c) = 0.473130
Ітерація 2: a = 1.000000, b = 1.500000, c = 1.250000, f(c) = -0.150995
Ітерація 3: a = 1.250000, b = 1.500000, c = 1.375000, f(c) = 0.143465
Ітерація 4: a = 1.250000, b = 1.375000, c = 1.312500, f(c) = -0.008197
Ітерація 5: a = 1.312500, b = 1.375000, c = 1.343750, f(c) = 0.066530
Ітерація 6: a = 1.312500, b = 1.343750, c = 1.328125, f(c) = 0.028890
Ітерація 7: a = 1.312500, b = 1.328125, c = 1.320312, f(c) = 0.010277
Ітерація 8: a = 1.312500, b = 1.320312, c = 1.316406, f(c) = 0.001022
Ітерація 9: a = 1.312500, b = 1.316406, c = 1.314453, f(c) = -0.003592
Ітерація 10: a = 1.314453, b = 1.316406, c = 1.315430, f(c) = -0.001286
Ітерація 11: a = 1.315430, b = 1.316406, c = 1.315918, f(c) = -0.000132
Ітерація 12: a = 1.315918, b = 1.316406, c = 1.316162, f(c) = 0.000445
Ітерація 13: a = 1.315918, b = 1.316162, c = 1.316040, f(c) = 0.000157
Ітерація 14: a = 1.315918, b = 1.316040, c = 1.315979, f(c) = 0.000012
Ітерація 15: a = 1.315918, b = 1.315979, c = 1.315948, f(c) = -0.000060
Ітерація 16: a = 1.315948, b = 1.315979, c = 1.315964, f(c) = -0.000024
Ітерація 17: a = 1.315964, b = 1.315979, c = 1.315971, f(c) = -0.000006
Наближений корінь 2: x2 = 1.31597
```

Рис. 2. Програмна реалізація методу дихотомії у Maple.

Використовуючи вбудовану функцію **Bisection**, отримаємо:

```
> with(Students[NumericalAnalysis]):
> x_1 := Bisection(f(x), x = [-1, 0], tolerance = 10-5);
x_1 := -0.5372734069
> x_1 := Bisection(f(x), x = [-1, 0], tolerance = 10-5, output = information, stoppingcriterion = absolute, maxiterations = 20);
```

n	a _n	b _n	P _n	f(P _n)	absolute error
1	-1.	0.	-0.5000000000	-0.101278729	0.5000000000
2	-1.	-0.5000000000	-0.7500000000	0.679500017	0.2500000000
3	-0.7500000000	-0.5000000000	-0.6250000000	0.258870957	0.1250000000
4	-0.6250000000	-0.5000000000	-0.5625000000	0.071460907	0.0625000000
5	-0.5625000000	-0.5000000000	-0.5312500000	0.016716136	0.0312500000
6	-0.5625000000	-0.5312500000	-0.5468750000	0.026917323	0.0156250000
7	-0.5468750000	-0.5312500000	-0.5390625000	0.004987239	0.0078125000
8	-0.5390625000	-0.5312500000	-0.5351562500	-0.005892736	0.0039062500
9	-0.5390625000	-0.5351562500	-0.5371093750	-0.000459827	0.0019531250
10	-0.5390625000	-0.5371093750	-0.5380859375	0.002261935	0.0009765625
11	-0.5380859375	-0.5371093750	-0.5375976563	0.000900612	0.0004882812
12	-0.5375976563	-0.5371093750	-0.5373535157	0.000220282	0.0002441406
13	-0.5373535157	-0.5371093750	-0.5372314453	-0.000119800	0.0001220704
14	-0.5373535157	-0.5372314453	-0.5372924804	0.000050234	0.0000610353
15	-0.5372924804	-0.5372314453	-0.5372619628	-0.000034785	0.0000305176
16	-0.5372924804	-0.5372619628	-0.5372772216	7.724 × 10 ⁻⁶	0.0000152588
17	-0.5372772216	-0.5372619628	-0.5372695922	-0.000013531	7.6294 × 10 ⁻⁶

```
x_1 := 1.315971374
> x_2 := Bisection(f(x), x = [1, 2], tolerance = 10-5);
x_2 := 1.315971374
> x_2 := Bisection(f(x), x = [1, 2], tolerance = 10-5, output = information, stoppingcriterion = absolute, maxiterations = 20);
```

n	a _n	b _n	P _n	f(P _n)	absolute error
1	1.	2.	1.5000000000	0.4731301601	0.5000000000
2	1.	1.5000000000	1.2500000000	-0.1509952031	0.2500000000
3	1.2500000000	1.5000000000	1.3750000000	0.1434645958	0.1250000000
4	1.2500000000	1.3750000000	1.3125000000	-0.0081974013	0.0625000000
5	1.3125000000	1.3750000000	1.3437500000	0.0665296481	0.0312500000
6	1.3125000000	1.3437500000	1.3281250000	0.0288896374	0.0156250000
7	1.3125000000	1.3281250000	1.3203125000	0.0102769332	0.0078125000
8	1.3125000000	1.3203125000	1.3164062500	0.0010224616	0.0039062500
9	1.3125000000	1.3164062500	1.3144531250	-0.0035917967	0.0019531250
10	1.3144531250	1.3164062500	1.3154296880	-0.0012857482	0.0009765625
11	1.3154296880	1.3164062500	1.3159179690	-0.0001319138	0.0004882812
12	1.3159179690	1.3164062500	1.3161621100	0.0004452078	0.0002441406
13	1.3159179690	1.3161621100	1.3160400400	0.0001566314	0.0001220710
14	1.3159179690	1.3160400400	1.3159790040	0.0000123534	0.0000610353
15	1.3159179690	1.3159790040	1.3159484860	-0.0000597822	0.0000305176
16	1.3159484860	1.3159790040	1.3159637450	-0.0000237149	0.0000152529
17	1.3159637450	1.3159790040	1.3159713740	-5.6821 × 10 ⁻⁶	7.629 × 10 ⁻⁶

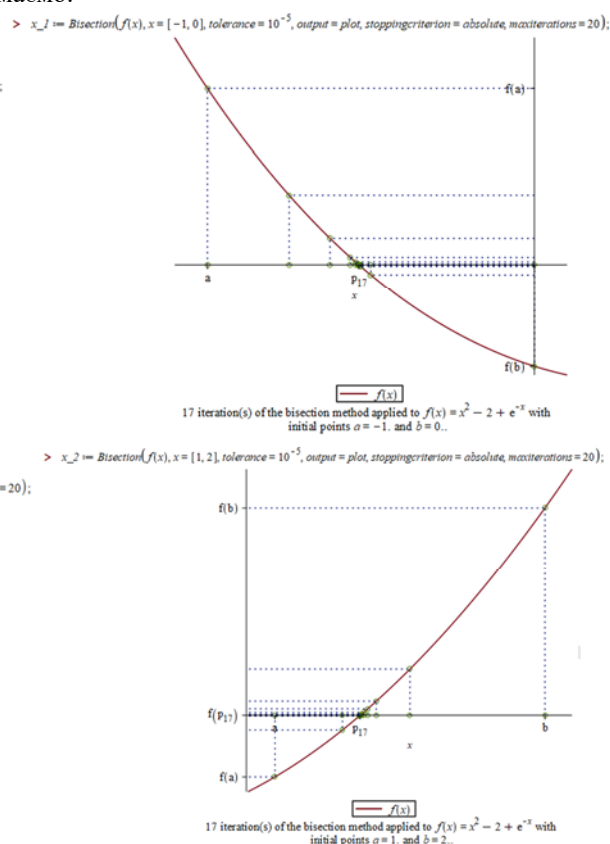


Рис. 3. Візуалізація методу дихотомії через вбудовану команду Bisection у Maple.

Порівнюючи наведені способи реалізації методу половинного поділу у Maple, видно, що бажана точність досягається за однакове число ітерацій 17.

Висновки. Розв'язування нелінійних рівнянь є однією з ключових задач прикладної математики, і жоден метод не є універсальним. В роботі було проведено повний аналіз рівняння (2) із застосуванням графічного методу відокремлення кореня та уточнення коренів одним з чисельних методів, а також реалізовано всі алгоритми в Maple. Метод дихотомії (бісекції) гарантує збіжність за умови зміни знаку на кінцях інтервалу, показав стабільну роботу на обох інтервалах, є найповільнішим, але найнадійнішим методом.

У [4] було реалізовано та досліджено чотири класичні методи: метод половинного поділу, метод хорд, метод Ньютона та метод простої ітерації.

References

1. Wang P., Zeng X. (2013) Solving Systems of Nonlinear Equations Using Maple. Applied Mechanics and Materials, vol. 427, 52–56. DOI: [10.1007/978-3-319-07671-3_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07671-3_7)
2. Brahinets O., & Vorobyova A. (2022). Using the mathematical program Maple to solve systems of linear algebraic equations by direct numerical methods. Computer-integrated technologies: education, science, production, (47), 55-63. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-47-08> [in Ukrainian].
3. Brahinets O. (2025). Using the mathematical program Maple to solve mathematical physics problems by numerical methods. Computer-integrated technologies: education, science, production, (59), 54-60. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-07> [in Ukrainian].
4. Brahinets O. (2026). Application of Maple to solving nonlinear equations by numerical methods. Computer-integrated technologies: education, science, production, (63), 107-115. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-63-11> [in Ukrainian].

**PRACTICAL APPLICATION OF THE GRAPHICAL METHOD AND THE DICHOTOMY METHOD FOR
NONLINEAR EQUATIONS IN MAPLE**

The theses consider the practical application of classical methods for solving nonlinear equations using the Maple computer mathematics system. Particular attention is paid to the graphical method of separating roots, which allows you to visually determine the intervals of their existence and provides initial information for further calculations. Additionally, the dichotomy (half division) method is described, which is one of the simplest and at the same time reliable algorithms for refining roots. The dichotomy method guarantees convergence for any continuous function with a change of sign at the ends of the interval, which makes it universal, although slower. Examples of the implementation of the specified methods in Maple are given, demonstrating the effectiveness of the software environment for educational and research purposes. The advantages of using Maple for visualizing functions, automating calculations, and checking results are shown. The practical application of these methods contributes to the formation of skills in analyzing nonlinear problems, the development of algorithmic thinking, and improving the quality of training of students in the field of applied mathematics. The study emphasizes the importance of integrating modern software tools into the educational process and scientific developments.

Keywords: nonlinear equations, dichotomy method, graphical method, Maple, numerical methods.

Відомості про автора / Information about the Author

Оксана Брагінець, к. фіз.-мат. наук, доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: oksana.brahinets@gmail.com, o.brahinets@chmnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2635-7203>.

Oksana Brahinets, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent of the Department of Intellectual Information Systems of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: oksana.brahinets@gmail.com, o.brahinets@chmnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2635-7203>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.07

Віктор Гожий

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ І ІНСТРУМЕНТИ ЦИФРОВОГО МАРКЕТИНГУ

В тезах проведено теоретико-методологічний аналіз використання цифрових технологій та сучасних інструментів цифрового маркетингу в сучасному маркетингу. Цифровий маркетинг характеризується як сучасний інструмент взаємодії між комерційними бізнес-структурами та споживачами послуг та товарів, що базується на сучасних інтелектуальних технологіях та цифрових інструментах.

Наголошується, що розвиток сучасних інтелектуальних технологій дозволив суттєво впливати на різні аспекти людської діяльності. Сучасні інтелектуальні технології та генеративний штучний інтелект стрімко перетворює цифровий маркетинг в головний інструмент соціальної взаємодії. Наведено опис сучасних інструментів цифрового маркетингу.

Ключові слова: Інтелектуальні технології, цифровий маркетинг, інструменти цифрового маркетингу.

Стрімкий розвиток сучасних інтелектуальних технологій (генеративний штучний інтелект, великі мовні моделі, нейронні мережі, машинне навчання, рекомендаційні системи та інші) суттєво впливає на різні аспекти людської діяльності. Серед них маркетингова діяльність. Епоха, коли маркетинг був лише представлений гучними слоганами та кольоровими банерами, в минулому. Сьогодні взаємодія зі споживачем перетворилася в цифрове спілкування та цифрову взаємодію, де кожен клік, кожна секунда на сайті та кожен коментар мають значення та ціну. Інтелектуальні технології та генеративний штучний інтелект стрімко перетворює цифровий маркетинг, змінюючи підхід до взаємодії зі споживачем від масової комунікації до глибоко персоналізованих діалогів. Це дає змогу спеціалістам маркетингу аналізувати величезні масиви даних і інформації, автоматизувати процеси маркетингу та створювати нові ефективні стратегії в різних областях сучасного маркетингу. Це вже не технологія майбутнього, а інструмент сучасного маркетингу.

Однією з основних переваг сучасних інтелектуальних технологій є їх здатність швидко налаштовуватись на конкретне завдання для конкретного клієнта. Завдяки алгоритмам машинного навчання, компанії можуть аналізувати поведінку кожного клієнта: його історію покупок, переглянуті сторінки, час, проведений на сайті, й реакцію на рекламні повідомлення.

Інтелектуальні технології це методи та алгоритми здатні аналізувати поведінку споживачів та великі обсяги даних з такою швидкістю та точністю, яка недоступна людині. Вони опрацьовують величезні масиви даних про історію покупок, перегляди, взаємодію з електронними листами та соціальними мережами. Це дозволяє створювати профіль кожного окремого користувача та надавати йому необхідний та актуальний контент.

Сучасні прориви в галузі генеративного інтелекту, згорткових нейронних мереж технологій глибокого навчання фундаментально змінює наше суспільство в багатьох аспектах, але, як і будь-яка нова технологія, вона ризикує стати жертвою зловживань, якщо її належним чином не регулювати. У бізнесі маркетингові заохочують використовувати інтелектуальні технології для впровадження та оптимізації маркетингових стратегій — від створення динамічного контенту до профілювання даних — але з мінімальними рекомендаціями щодо впровадження [1].

Існують і інші проблеми — одна з головних з них — упередженість. Упередженість присутня в усьому, що ми робимо, і її поширення добре задокументовано як поширене явище в маркетингу через маркетинголога; однак використання сучасних інтелектуальних технологій може посилити існуючі упередження. Наразі не існує глобального управління, яке б регулювало використання окремих інструментів штучного інтелекту в бізнесі, що призводить до відсутності управління для співробітників, які використовують його у своїх компаніях. Однак дослідження *Gartner* проведене ще у 2024 році показало, що більше 60% керівників маркетингу планують інвестувати та впроваджувати штучний інтелект у свою маркетингову практику протягом наступних 24 місяців, і, за прогнозами, це впровадження збільшить продуктивність більш ніж на 70% протягом наступних п'яти років [2]. Хоча загально визнано, що упередженість очевидна в більшості маркетингових заходів, бракує розвинених

інструментів, які допоможуть виявляти та пом'якшувати упередженість у маркетингу на основі сучасних інформаційних технологій.

Максимальне охоплення компанією цільової аудиторії передбачає використання відповідних інструментів цифрового маркетингу, перелік яких змінюється залежно від зміни впливу факторів навколишнього середовища. Соціальні, економічні та культурні особливості

споживачів у різних країнах світу слід враховувати під час здійснення діяльності брендами на міжнародному рівні. Коригування маркетингової стратегії в цифровому середовищі здійснюється на основі системної інформації, яку компанії отримують з різних джерел, включаючи сервіси веб-аналітики.

Для більш ґрунтовного розуміння можливостей застосування сучасних інтелектуальних технологій в маркетинговій сфері доцільно проаналізувати основні інструменти цифрового маркетингу (рис. 1)

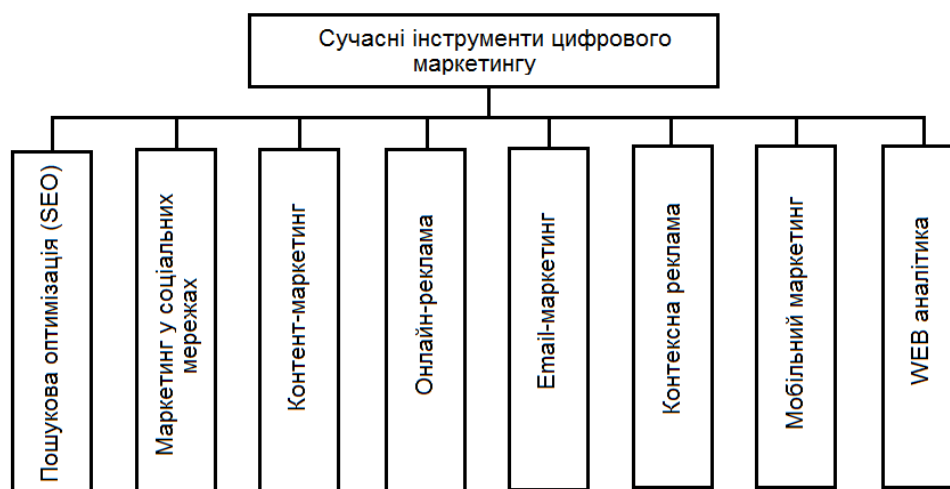


Рис. 1. Сучасні інструменти цифрового маркетингу
Джерело сформовано автором на основі [3]

Характеристики сучасних інструментів цифрового маркетингу.

Пошукова оптимізація (SEO) передбачає реалізацію комплексу заходів для підвищення позицій веб-ресурсів компаній у пошукових системах. На початок 2026 року понад 90% ринку займає Google, що вимагає від компанії адаптації до вимог пошукових алгоритмів представленого сервісу в Інтернеті. Органічний трафік є важливим елементом взаємодії з цільовою аудиторією, оскільки близько 50% трафіку до веб-ресурсів компаній залучається в результаті формування запитів користувачів у пошукових системах та переходу на ресурси за отриманими посиланнями. Формування семантичного ядра сайту та оновлення списку ключових слів з постійною маркуванням контенту, розміщеного на ресурсі, допомагає забезпечити високі позиції в запитах. Проведення аудиту веб-ресурсів для виявлення оптимальності його архітектури, моніторинг зовнішніх та внутрішніх посилань, оновлення контенту та інші заходи важливі для ефективності *SEO*.

Маркетинг у соціальних мережах – це дуже ефективний інструмент цифрового маркетингу, оскільки він дозволяє компаніям постійно взаємодіяти з переважною більшістю поколінь. Забезпечення великої кількості підписників та підтримка інтересу в довгостроковій перспективі вимагає від компанії розробки та впровадження ефективної маркетингової стратегії у відповідних соціальних мережах. Присутність великої кількості соціальних мереж, серед яких *YouTube, Facebook, Instagram, TikTok* та *Snapchat* є найпопулярнішими, передбачає створення спеціалізованого контенту під специфіку певної мережі: текстові матеріали, аудіо, фото та відео. Залучення уваги забезпечується завдяки контенту, який користується значним попитом серед цільової аудиторії, відповідно, існує потреба постійно вивчати інтереси користувачів. Підтримка інтересу досягається шляхом формування ефективного контент-плану, який передбачає розміщення публікацій відповідно до визначених оптимальних часових інтервалів.

Контент-маркетинг виділяється як окремий інструмент, оскільки в сучасному цифровому середовищі компанії постійно генерують великі обсяги різноманітного контенту, щоб привернути увагу цільової аудиторії. Формування цифрового шуму призводить до втрати інтересу багатьох споживачів до великих обсягів різноманітного контенту, що вимагає від брендів впровадження складних маркетингових стратегій для залучення

нових користувачів. Існує потреба не лише у створенні релевантного контенту, але й у впровадженні ефективних моделей комунікації з цільовою аудиторією. Важливим елементом контент-маркетингу також є комплексне дослідження інтересів цільової аудиторії та конкурентної розвідки, що дозволяє компаніям генерувати високоякісний захопливий контент.

Онлайн-реклама використовується для просування компаній в Інтернеті на різних ресурсах, які виступають зручними платформами для розміщення тематичного рекламного контенту. Характерною особливістю цифрового середовища є можливість інтеграції реклами в різних форматах на різних ресурсах та в усьому контенті. Основними видами онлайн-реклами є медійна реклама, спам та цільові сторінки.

Контекстна реклама виділяється як окремий вид онлайн-реклами, оскільки вона здійснюється відповідно до запитів відповідних користувачів. Пошук цільовою аудиторією певних товарів і послуг призводить до показу тематичного рекламного контенту. Ключові слова дозволяють компаніям підбирати рекламу для окремого споживача, стимулюючи до купівлі продукції певних брендів.

Email-маркетинг використовується для встановлення взаємодії з цільовою аудиторією за допомогою розсилки електронних листів. Представлений інструмент цифрового маркетингу характеризується різним рівнем популярності в країнах світу, що пов'язано з культурними особливостями та орієнтацією на різні ресурси в Інтернеті для комунікації. Завдяки використанню автоматизованих сервісів можливо налаштувати розсилку для певних груп споживачів у встановлений час з використанням персоналізованих звернень та інтегрованого тематичного контенту.

Мобільний маркетинг використовується компаніями через значну популярність серед сучасних користувачів смартфонів та планшетів. Представники різних поколінь щодня витрачають значну кількість часу на роботу, навчання та відпочинок завдяки мобільним пристроям. Реалізація складних маркетингових стратегій на мобільних пристроях передбачає використання web-ресурсів, адаптивних версій під розміри екранів відповідних гаджетів та спеціалізованих додатків. Камери, інтегровані в мобільні пристрої, використовуються для сканування QR-кодів, що дозволяє зручно та швидко отримувати доступ до web-ресурсів брендів або окремих продуктів.

Веб-аналітика дозволяє моніторити різну діяльність компанії в цифровому середовищі, а також оцінювати поведінку користувачів та проводити конкурентний аналіз. Завдяки використанню спеціалізованих сервісів можливо збирати складну інформацію на постійній основі. Гнучкість веб-аналітики передбачає вибір необхідної системи метрик та її

коригування відповідно до існуючих потреб. Компанія може використовувати *Google Analytics* для оцінки маркетингової стратегії своїх веб-ресурсів. Оцінка ресурсів конкурентів здійснюється завдяки різним продуктам, доступним на ринку, серед яких доцільно звернути увагу насамперед на *Adobe Analytics*, *Ahrefs*, *Kissmetrics*, *HubSpot* та *SimilarWeb*. Моніторинг цифрового середовища дозволяє компаніям оцінювати поточну ситуацію, виявляючи потенційні ризики та можливості для ефективного розвитку.

Взаємодія між компаніями та користувачами в цифровому середовищі передбачає використання інноваційних технологій. Інтелектуальні технології належить до важливих технологій в галузі цифрового маркетингу, що дозволяє підвищити ефективність взаємодії

між компаніями та користувачами в цифровому середовищі. Наявність великої кількості інтелектуальних методів та алгоритмів дозволяє забезпечити гнучкість в обробці великих даних та забезпечити вибір оптимальних моделей для конкретних стратегій цифрового маркетингу.

References

1. Ярова Ю. (2026). Штучний інтелект у цифровому маркетингу. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки., №1, 2026 (pp. 119-125). DOI <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2026-350-15> [in Ukrainian].
2. Фігун А.В., Петрівський Я. Б., Коханевич Т. П. Штучний інтелект у маркетингу: можливості впливу та перспективи впровадження. 2024. <https://scispace.com/pdf/shtuchnii-intelekt-u-marketingumozhливosti-vplivu-ta-1ckjh9ky.pdf>, 9 (4), (pp. 95-104) [in Ukrainian].
3. Silva, K. (2024, March 27). 10 Effective Digital Marketing Channels & How to Use Them. <https://www.semrush.com/blog/digital-marketing-channels> [in English].

INTELLIGENT TECHNOLOGIES AND DIGITAL MARKETING TOOLS

The theses provide a theoretical and methodological analysis of the use of digital technologies and modern digital marketing tools in modern marketing. Digital marketing is characterized as a modern tool for interaction between commercial business structures and consumers of services and goods, based on modern intelligent technologies and digital tools.

It is emphasized that the development of modern intelligent technologies has allowed to significantly influence various aspects of human activity. Modern intelligent technologies and generative artificial intelligence are rapidly transforming digital marketing into the main tool of social interaction. A description of modern digital marketing tools is provided.

Keywords: *Intelligent technologies, digital marketing, digital marketing tools.*

Відомості про автора / Information about the Author

Віктор Гожий, кандидат технічних наук, ст. викладач кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: gozhyi.v@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5341-0973>

Viktor Gozhyi, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Intellectual Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: gozhyi.v@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5341-0973>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.08

Олександр Гожий,
Ірина Калініна

ДИСБАЛАНС КЛАСІВ В ЗАДАЧАХ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

В тезах розглядається вирішення завдань класифікації з врахуванням дисбалансу класів. Проведено аналіз типів дисбалансу. Розглянуто особливості типів дисбалансу. Проаналізовано провідні концепції та методи вирішення проблеми дисбалансу класів. Визначено особливості застосування різних методів врахування дисбалансу класів які спрямована на аналіз даних, попередню обробку, балансування вибірки та побудову моделей машинного навчання для прогнозування. Головною особливістю представлених методів врахування дисбалансу є підвищення точності класифікації шляхом усунення дисбалансу класів та використання ансамблевих методів навчання, здатних ефективно працювати з нерівномірно розподіленими даними. Було проведено аналіз ефективності різних груп методів врахування дисбалансу класів.

Ключові слова: Класифікація, дисбаланс класів, типи методів дисбалансу, класифікація, машинне навчання, методи врахування дисбалансу класів.

Сучасний рівень розвитку інформаційних технологій дозволяє застосовувати різні методи машинного навчання для аналізу великих обсягів даних. Такі методи забезпечують автоматизацію процесів моніторингу, аналізу тенденцій і прогнозування при вирішенні завдань різного типу. Проте, при роботі з реальними наборами даних виникає низка проблем, серед яких найважливішою є дисбаланс класів. У більшості випадків дані про критичні або аномальні ситуації представлені значно меншою кількістю спостережень, ніж нормальні умови. Це призводить до того, що алгоритми машинного навчання орієнтуються переважно на більші об'єми даних і недостатньо ефективно розпізнають критичні випадки, які не можливо не враховувати і вони мають найбільше значення при вирішенні прикладних завдань [1]. Тому важливо при побудові інтелектуальної системи класифікації системно враховувати особливості дисбалансу даних на кожному етапі вирішення задачі класифікації.

Сучасні дослідження в галузі класифікації із врахуванням дисбалансу класів охоплюють широкий спектр методів – від класичних технік балансування вибірки до інтегрованих гібридних моделей машинного навчання.

Дисбаланс класів виникає, коли кількість прикладів одного класу суттєво переважає інший. У реальних наборах даних спостерігається саме такий перекося, оскільки аномальні події трапляються значно рідше за нормальні. *Мажоритарний* клас (більшість елементів) та *міноритарний* клас (меншість елементів) було схематично показано як елементи дисбалансу класів на рисунку 1.

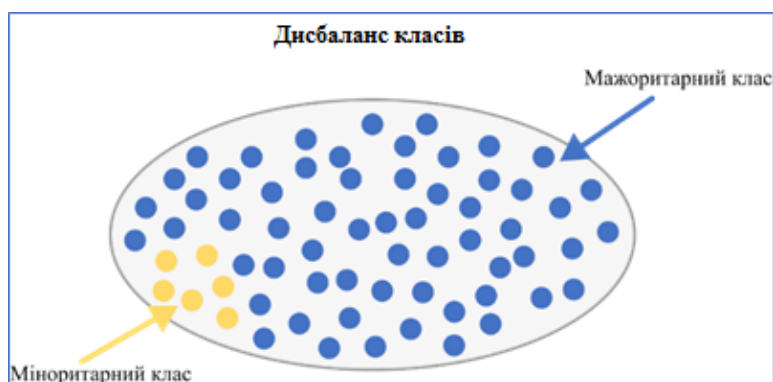


Рис. 1. Елементи дисбалансу класів
Джерело: сформовано авторами

Типи дисбалансу класів можна умовно поділити на три категорії: легкий, середній та сильний (див. рис. 2). У випадку легкого дисбалансу можна застосовувати стандартні методи класифікації без значних змін.

При середньому та сильному дисбалансі рекомендується використовувати спеціалізовані методи балансування, такі як *undersampling* (зменшення кількості прикладів більшого класу), *oversampling* (збільшення кількості прикладів меншого класу), *SMOTE* (*Synthetic Minority Oversampling Technique*, генерація синтетичних прикладів меншості), та *ROSE* (*Random OverSampling Examples*, генерація нових прикладів з урахуванням розподілу класів) [1,2].

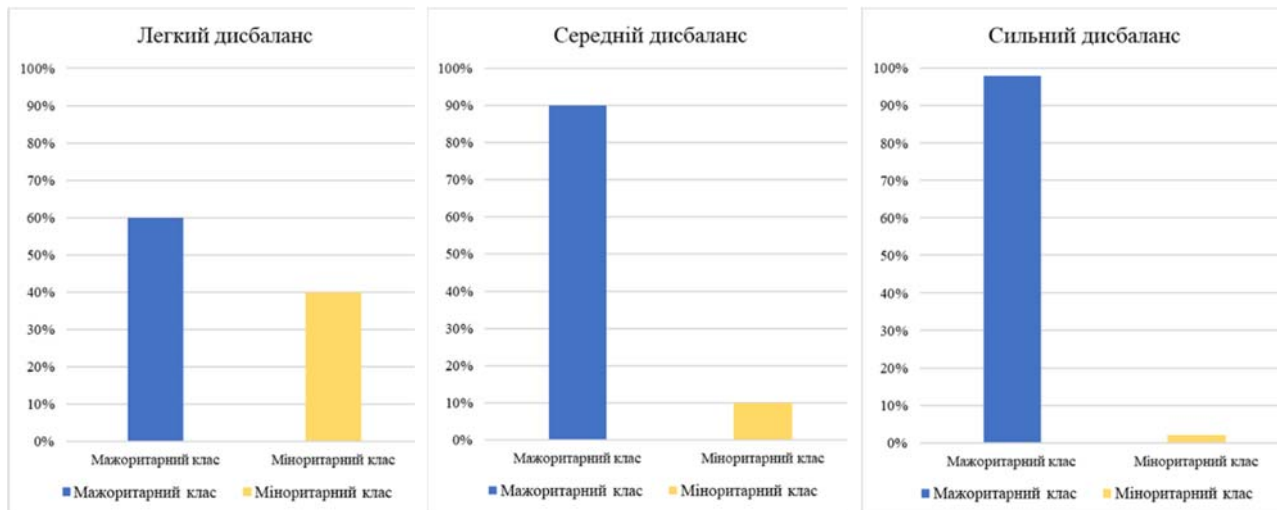


Рис. 2. Типи дисбалансу класів
 Джерело: сформовано авторами

В таблиці 1 представлені опис типів дисбалансу класів.

Таблиця 1.

Опис типів дисбалансу класів		
Ступінь дисбалансу	Співвідношення класів (Majority:Minority)	Відсоток меншості (%)
Легкий	2:1 – 5:1	20% – 40%
Середній	10:1 – 50:1	2% – 10%
Сильний	>100:1	<1%

За складністю дисбаланс буває: збалансований, міжкласовий, внутрішньокласовий, змішаний.

Збалансований класовий розподіл – це ситуація, коли кожен клас у наборі даних представлений приблизно однаковою кількістю прикладів. У такому випадку навчальні алгоритми отримують рівномірну інформацію про всі класи, що дозволяє моделі навчатися без упередження до будь-якої з категорій.

Дисбаланс класів може проявлятися як *міжкласовий* та *внутрішньокласовий*. *Міжкласовий* дисбаланс означає, що класи мають різну кількість прикладів. Проблема *міжкласового* дисбалансу полягає у тому, що базові метрики оцінки моделі вводять в оману: модель, яка завжди передбачає більший клас, демонструє високу точність, проте рідкісні приклади меншості ігноруються.

Внутрішньокласовий дисбаланс виникає, коли в одному класі присутні підгрупи з різним рівнем представленості. Наприклад, клас позитивних прикладів може містити одну велику підгрупу та одну або кілька рідкісних підгруп з окремими характеристиками.

У такому випадку модель, тренуючись на великій підгрупі, не навчається розпізнавати рідкісні підгрупи, які фактично стають «невидимими». Застосування стандартних методів *oversampling*, таких як *SMOTE*, може створювати синтетичні приклади між різними підгрупами, що призводить до змивання структури даних або пропуску рідкісних підгруп [3].

Складним випадком є поєднання дисбалансу та перекриття класів, коли класи не тільки нерівні, але й сильно «змішані». Навіть при вирівнюванні кількості прикладів за допомогою *oversampling* не гарантується покращення

роздільної здатності моделі: синтетичні точки часто потрапляють у зони перекриття, що підвищує рівень шуму та збільшує кількість помилкових спрацьовувань (*False Positives*) і пропусків (*False Negatives*), особливо для міноритарного класу.

Групи методів врахування дисбалансу класів – це класифікація підходів, які використовуються для роботи з даними, де класи представлені нерівномірно, щоб покращити ефективність моделей машинного навчання (див. рис. 3) [4]. Це різні способи вирішення проблеми, коли рідкісні (міноритарні) класи можуть бути ігноровані моделлю через їхню малу кількість у наборі даних.



Рис. 3. Групи методів врахування дисбалансу класів
 Джерело: сформовано авторами

Для боротьби з дисбалансом класів на етапі препроцесінгу даних можна застосовувати методи повторної вибірки. До *oversampling* підходів належать *Random Oversampling* (просте дублювання прикладів), *SMOTE*, *Borderline-SMOTE*, *ADASYN* та *ROSE*. *Undersampling* включає *Random Undersampling*, *Tomek Links*, *Edited Nearest Neighbors (ENN)* та *NearMiss*. Існують також гібридні методи, що поєднують обидва підходи, наприклад *SMOTE + Tomek Links* або *SMOTE + ENN*.

Методи навчання, чутливого до втрат, реалізуються безпосередньо на етапі навчання моделі та враховують дисбаланс класів у функції втрат. До них належать встановлення ваг класів у *Logistic Regression* (логістична регресія), *SVM* (Support Vector Machine, метод опорних векторів) або *Random Forest* (випадковий ліс), використання зваженої крос-ентропії у нейронних мережах, застосування *cost matrix* (матриці затрат) та зміщення порогу класифікації. Однак ці підходи поки не використовуються на етапі препроцесінгу.

Варто зазначити, що звичні метрики оцінки класифікації, такі як *Accuracy* (точність), у разі дисбалансу класів не відображають реальної якості моделі. Для оцінювання застосовуються метрики, стійкі до дисбалансу: *F1-score* (гармонійне середнє точності та повноти), *Balanced Accuracy* (збалансована точність), *AUC-ROC* (Area Under the Receiver Operating Characteristic curve, площа під кривою операційної характеристики), *AUC-PR* та *MCC* (Matthews Correlation Coefficient, коефіцієнт кореляції Меттьюса). Використання стратифікованої крос-валідації матриці неточностей дозволить детальніше аналізувати результати.

В сучасних дослідженнях для задач з дисбалансом класів успішно застосовуються ансамблеві методи, які демонструють кращу ефективність порівняно з окремими сильними алгоритмами, такими як *SVM*, *KNN* (*K-Nearest Neighbors*, k-найближчих сусідів) або нейронні мережі. Серед таких методів – *BalancedBagging*, *RUSBoost*, *SMOTEBoost*, *EasyEnsemble*, *BalanceCascade*. Вони дозволяють врахувати нерівність класів під час навчання і підвищують якість класифікації рідкісних, але важливих прикладів.

Додатково можуть використовуватися методи генерації синтетичних даних за допомогою *GANs* (*Generative Adversarial Networks*, генеративно-змагальні нейронні мережі) або *VAEs* (*Variational Autoencoders*, варіаційні автоенкодери), перенесення знань з іншої задачі (*transfer learning*) для перенесення знань з іншої задачі, а також аугментація даних (*data augmentation*) для тексту, зображень чи аудіо – наприклад, повороти, віддзеркалення, додавання шуму або синонімічна заміна. Залучення зовнішніх джерел даних для менш представленого класу також підвищує якість навчання.

Проблема дисбалансу класів є важливою для інтелектуальних систем класифікації, оскільки забезпечує коректне розпізнавання рідкісних, але критично важливих станів вирішення різних завдань. Методи балансування на етапі препроцесінгу дозволяють ефективно підготувати дані для навчання моделей та підвищити їхню практичну цінність при вирішенні різних задач машинного навчання.

References

1. He H., Garcia E. A. Learning from Imbalanced Data // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2009. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5128907>. [in English]
2. KNIME Blog. 4 Techniques to Handle Imbalanced Datasets [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.knime.com/blog/4-techniques-handle-imbalanced-datasets> [in English]
3. Chawla N. V., Bowyer K. W., Hall L. O., Kegelmeyer W. P. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique // Journal of Artificial Intelligence Research. – 2002. – Режим доступу: <https://www.jair.org/index.php/jair/article/view/10302>. [in English]
4. Douzas G., Bacao F. Imbalanced Learning in Land Cover Classification: Geometric SMOTE // Remote Sensing. – 2019. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/24/3040>. [in English]

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.08

Oleksandr Gozhyj
Iryna Kalinina

CLASS IMBALANCE IN MACHINE LEARNING PROBLEMS

The abstracts consider solving classification problems taking into account class imbalance. An analysis of the types of imbalance is carried out. The features of the types of imbalance are considered. The leading concepts and methods for solving the problem of class imbalance are analyzed. The features of the application of various methods for taking into account class imbalance are determined, which are aimed at data analysis, pre-processing, sample balancing and building machine learning models for forecasting. The main feature of the presented methods for taking into account imbalance is to increase the accuracy of classification by eliminating class imbalance and using ensemble learning methods that can effectively work with unevenly distributed data. An analysis of the effectiveness of different groups of methods for taking into account class imbalance was carried out.

Key words: Classification, class imbalance, types of imbalance methods, classification, machine learning, methods for taking into account class imbalance.

Відомості про авторів/ Information about the Author

Олександр Гожий, доктор технічних. наук, професор, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: alex.gozhyj@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0006-3317-1115>

Oleksandr Gozhyj, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Intellectual Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: alex.gozhyj@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0006-3317-1115>

Ірина Калініна, доктор технічних. наук, професор, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: irina.kalinina1612@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8359-2045>

Iryna Kalinina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Intellectual Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: irina.kalinina1612@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8359-2045>

ПОКРАЩЕННЯ СЕГМЕНТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ШЛЯХОМ УРАХУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Останні дослідження архітектур нейронних мереж для сегментації зображень відображають значні покращення точності й ефективності моделей. Водночас існує необхідність врахування оцінки невизначеності й інтерпретованості результатів, що підкреслює актуальність даного напрямку.

Зазначається, що оцінка впевненості (або невизначеності) моделі є не менш важливою ніж точність сегментації, особливо в таких задачах як аналіз пошкоджень об'єктів або оцінка збитків, оскільки подібні показники можуть бути використані для подальшого прийняття рішень. В рамках дослідження побудовано модель модифікованої архітектури U-Net із модулем ASPP для сегментації пошкоджених будівель на зображеннях, розрахунок невизначеності реалізовано за допомогою множинного запуску моделі із різними масками відсіювання (Monte Carlo Dropout).

Отримані результати дослідження дозволяють стверджувати про ефективність поєднання ASPP із різними функціями втрат як CCE і Dice Loss, а також їх комбінацією: досягнуто приросту 3.8% середнього IoU, 4% для вицілілих і 5.3% для зруйнованих будівель.

Було розраховано дисперсію, ентропію та взаємну інформацію, і у поєднанні із MCD побудовано сегментаційні маски невизначеностей, що відображають оцінки моделей стосовно сегментації кожного досліджуваного зразка. Використання двох порогових значень впевненості й невизначеності моделі для виділення найбільш важливих ділянок сегментації дозволило частково покращити результати. Для практичного впровадження описаних методів і підходів існує необхідність їх подальшого дослідження.

Ключові слова: розпізнавання пошкоджених будівель, згорткові нейронні мережі, комп'ютерний зір, семантична сегментація, Monte Carlo Dropout, ASPP, U-Net, Google Earth.

Руйнування, що приносять повені, урагани, землетруси й інші природні катастрофи, а також діяльність спричинена людиною, наприклад, бойові дії та війни, можуть вимірюватися сотнями й тисячами квадратних кілометрів. Опрацювання даних людиною займає критично багато часу, автоматизація дозволяє знаходити пошкоджені ділянки й прискорювати попередній аналіз.

Для вирішення задач виявлення об'єктів на зображеннях, а також сегментації, зазвичай застосовують згорткові нейронні мережі, такі як YOLO, ResNet, U-Net та інші. Кожна архітектура має власні переваги, так U-Net і її модифікації дозволяють точніше сегментувати зображення за рахунок механізмів уваги або окремих модулів [1-2]. Водночас існує необхідність більш детального дослідження оцінок невизначеності моделей.

Аналіз останніх досліджень в цьому напрямі показує, що серед основних підходів оцінки невизначеності наводять калібрацію моделей, моделювання невизначеностей завдяки байєсівським процесам (або наближених до них методів), а також деяких інших [3-4]. Так доволі популярним методом є Monte Carlo Dropout (MCD), який дозволяє моделювати набори прогнозів для розрахунку невизначеності моделей шляхом множинних проходів моделі із активованим шаром dropout.

Актуальність роботи підтверджується необхідністю аналізу можливостей кількісної оцінки невизначеності сегментаційних моделей для розпізнавання пошкоджених будівель, що дозволить підвищити ефективність й точність сегментації, що є важливим кроком для пришвидшення й покращення попереднього аналізу пошкоджень на великих територіях.

В рамках дослідження було побудовано декілька моделей архітектури U-Net зі зміненим найвужчим місцем моделі (bottleneck) на модуль Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP), що наведено на рис. 1.

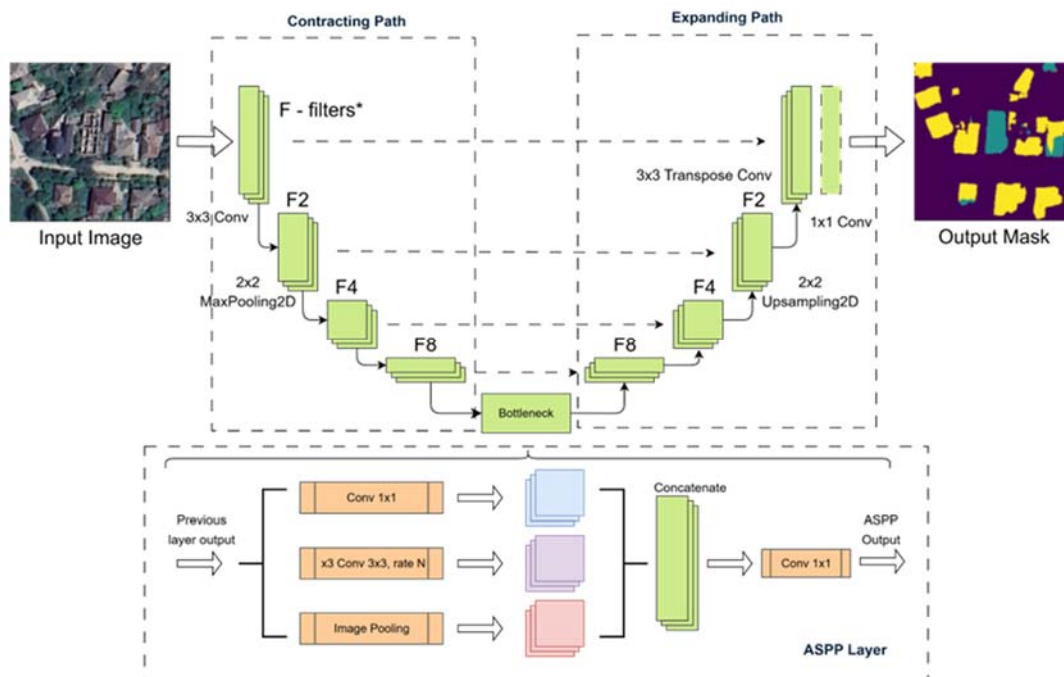


Рис. 1. Модифікована архітектура U-Net із шаром ASPP.

Джерело: сформовано автором на основі [1]

Архітектура моделі побудована за принципом кодер-декодер і складається зі стискаючого та розширюючого шляхів, що забезпечують виділення ознак і сегментацію зображення: у кодері використовуються згорткові блоки з операціями 3×3 , функціями активації, підвibrкою через 2×2 пулінг і dropout, тоді як декодер виконує апсемплінг, конкатенацію ознак із кодера та повторне застосування dropout. Для ефективного вилучення багатомасштабних ознак застосовується модуль ASPP, який містить кілька шарів із розрідженими (dilated convolutions) фільтрами, що дає змогу розширити рецептивне поле без суттєвого збільшення обчислювальної складності [2]. Після об'єднання результатів із різних гілок виконується згортка для узгодження розмірності, а сформовані ознаки передаються до декодера, який генерує фінальну сегментаційну маску.

Метод Monte Carlo Dropout набув широкого застосування для оцінювання невизначеності в глибоких нейронних мережах завдяки своїй простоті та ефективності. У роботі Yarin Gal та Zoubin Ghahramani було продемонстровано, що dropout можна трактувати як наближений баєсівський висновок, у межах якого модель представлена набором стохастичних підмереж. На етапі інференсу dropout не вимикається, а для кожного вхідного зразка здійснюється серія проходів. Це дало змогу сформувати множину прогнозів, на основі яких було розраховано середнє значення, дисперсію та ентропію, що в подальшому застосовано для побудови масок невизначеностей. Завдяки цьому метод дозволяє не лише підвищити стабільність передбачень, а й отримати числову оцінку невизначеності моделі.

Для оцінювання невизначеності застосовано показники дисперсії, прогностичної ентропії та взаємної інформації, які є поширеними метриками в підходах на основі Monte Carlo Dropout. Дисперсія характеризує розкид прогнозів, ентропія відображає загальний рівень невизначеності, тоді як взаємна інформація дає змогу оцінити епістемічну складову через відмінності між окремими прогнозами та їх усередненим результатом.

Крім того, для порівняння застосовано комбіновану функцію втрат, що поєднує CCE та Dice Loss і сприяє максимізації перекриття між передбаченою та еталонною сегментаційними масками. Результати досліджень наведені у табл. 1.

Таблиця 1.

Порівняльна таблиця побудованих моделей з розрахованими метриками

Функція втрат	Інші параметри	Loss		IoU Damaged		IoU Intact		IoU Mean	
		Val	Test	Val	Test	Val	Test	Val	Test
CCE	Базова модель	0.275	0.269	0.415	0.395	0.418	0.406	0.546	0.539
	32 фільтри, 0.2 dropout, 10 аугмент.	0.232	0.224	0.436	0.43	0.42	0.409	0.55	0.546
	32 фільтри, 0.3 dropout, 10 аугмент. *	0.147	0.146	0.462	0.453	0.47	0.45	0.586	0.577
	32 фільтри, 0.4 dropout, 10 аугмент.	0.155	0.153	0.437	0.43	0.436	0.423	0.557	0.553
Combined loss	Базова модель	0.256	0.245	0.41	0.404	0.413	0.427	0.559	0.555
	32 фільтри, 0.2 dropout, 10 аугмент.	0.227	0.221	0.431	0.423	0.42	0.399	0.56	0.552
	32 фільтри, 0.3 dropout, 10 аугмент.	0.204	0.199	0.454	0.448	0.462	0.446	0.582	0.577
	32 фільтри, 0.4 dropout, 10 аугмент. **	0.201	0.196	0.456	0.448	0.459	0.444	0.584	0.577

Джерело: сформовано автором на основі власного дослідження

Згідно з результатами, використання комбінованої функції втрат може підвищувати точність сегментації, а збільшення варіативності дропауту сповільнює перенавчання, що в свою чергу впливає на розрахунок невизначеності. Таким чином, найкраща модель U-Net з ASPP та комбінованою функцією втрат у рамках дослідження забезпечила приріст до 3.8% середнього IoU та до 5.3% для зруйнованих будівель.

На основі дисперсії, ентропії та взаємної інформації було також сформовано маски невизначеності (рис. 2), які використано для покращення процесу сегментації шляхом урахування двох характеристик: рівня впевненості моделі у віднесенні кожного пікселя до певного класу та відповідного значення невизначеності для кожного пікселя, розрахованого на основі усередненої маски. Отримані результати свідчать про те, що застосування таких показників може як підвищувати якість сегментації, так і призводити до її погіршення залежно від низки чинників, серед яких особливості вхідного зображення, обраний метод оцінювання невизначеності, а також архітектура й параметри налаштування моделі.

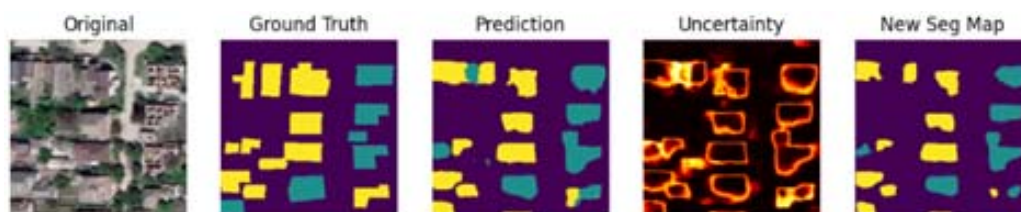


Рис. 2. Приклад оригінальної сегментації моделі та на основі змін з врахуванням двох порогових значень.

Джерело: сформовано автором на основі власного дослідження

References

1. Yang Q., Wang Z., Liu S., Li Z. Research on improved U-net based remote sensing image segmentation algorithm. *arXiv*, 2024. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.12672> (дата звернення: 05.05.2026).
2. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2015. Vol. 37, No. 9. P. 1904–1916. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.4729> (дата звернення: 05.05.2026).
3. Gal Y., Ghahramani Z. Dropout as a Bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning // *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning*. 2016. Vol. 48. P. 1050–1059. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02142> (дата звернення: 07.05.2026).
4. Rey M., Mnih A., Neumann M., Overlan M., Purves D. Uncertainty evaluation of segmentation models for Earth observation. *arXiv*, 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.19586> (дата звернення: 08.05.2026).

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.09

Valerii Dymo

IMPROVING SEGMENTATION MODELS BY ACCOUNTING FOR UNCERTAINTY

Recent studies of neural network architectures for image segmentation demonstrate significant improvements in the accuracy and efficiency of models. At the same time, there is a need to take into account the assessment of uncertainty and interpretability of results, which emphasizes the relevance of this direction.

It is noted that the assessment of the confidence (or uncertainty) of the model is no less important than the accuracy of segmentation, especially in such tasks as object damage analysis or loss assessment, since such indicators can be used for further decision-making. Within the framework of the study, a model of the modified U-Net architecture with the ASPP module for segmentation of damaged buildings was built, the calculation of uncertainty was implemented using multiple runs of the model with different screening masks (Monte Carlo Dropout).

The obtained results of the study allow us to state the effectiveness of combining ASPP with various loss functions such as CCE and Dice Loss, as well as their combination: an increase of 3.8% of the average IoU was achieved, 4% for intact and 5.3% for destroyed buildings.

The variance, entropy and mutual information were calculated, and in combination with MCD, segmentation uncertainty masks were generated, reflecting the model estimates regarding the segmentation of each studied sample. The use of two thresholds of confidence and model uncertainty to highlight the most important segments of the segmentation allowed to partially improve the results. For the practical implementation of the described methods and approaches, there is a need for their further study.

Key words: *damaged building recognition, convolutional neural networks, computer vision, semantic segmentation, Monte Carlo Dropout, ASPP, U-Net, Google Earth.*

Відомості про автора / Information about the Author

Валерій Димо, аспірант, викладач кафедри інтелектуальних інформаційних систем факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: dymovalery@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0001-6024-3018>.

Valerii Dymo, PhD student, lecturer of the Department of Intellectual Information Systems of the Faculty of Computer Sciences of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: dymovalery@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0001-6024-3018>.

© В. Димо

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.10

Ірина Калініна,
Олександр Гожий

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА

Анотація. Представлено розробка та дослідження інтелектуальної системи, яка дозволяє підвищити якість моніторингу палива на морських судах. Дослідження розширює існуючі відкриті моделі прогнозування витрат палива та пропонує альтернативу комерційним рішенням шляхом системного використання комбінації актуальних методів інтелектуального аналізу даних. Реалізовано інтелектуальну систему, що дозволяє прогнозувати витрати палива та виявляти аномалії у використанні ПММ на основі телеметричних даних. Запропонована архітектура інформаційної системи забезпечує системний підхід до прогнозування, шляхом поєднання методів попередньої обробки даних, машинного навчання, ансамблевого моделювання та інтелектуальної аналітики. Модульна структура системи забезпечує її масштабованість, гнучкість та можливість інтеграції нових алгоритмів і джерел даних. Для підтвердження ефективності розробленої інформаційної системи було проведено експериментальні дослідження із використанням набору даних Ship Fuel Consumption & CO2 Emissions Analysis. Отримані результати підтвердили високу точність побудованих моделей та практичну цінність розробленого підходу. Експериментально встановлено, що найвищу точність прогнозування забезпечує нейромережева модель із підібраними параметрами ($R^2 = 0.9651$), результати якої перевершують існуючі відкриті рішення на платформі Kaggle. Створено практичний прототип інтелектуальної системи з клієнт-серверною архітектурою та механізмом виявлення аномалій у споживанні палива.

Ключові слова: інтелектуальна система, витрата палива, аномалії, машинне навчання, моделювання, прогнозування.

Вступ

Останнім часом сучасна морська індустрія перебуває на критичному етапі свого розвитку. Тут перетинаються глобальні геополітичні кризи, жорсткі екологічні вимоги та стрімка цифровізація. Високі ціни на паливо та правила судноплавства чинять більший тиск на судноплавні компанії, щоб знайти способи підвищити паливну ефективності своїх суден та при цьому зменшити витрати і не виходити за межі нових правил. Відомо, що паливо становить найбільшу частину вартості рейсу, тому невелика економія палива може призвести до значної загальної економії у морської індустрії. Більше того, скорочення споживання палива значно сприяє зменшенню екологічного забруднення, що стало світовою проблемою.

Морський транспорт забезпечує понад 80% світової торгівлі і при цьому стикається з необхідністю трансформації операційних моделей для збереження економічної конкурентоспроможності та відповідності міжнародним стандартам [1]. Питання ефективного використання палива стає центральним у цій трансформації, оскільки витрати на паливо становлять від 40% до 60% загальних операційних витрат судна, а процеси згоряння є основним джерелом викидів парникових газів у галузі [2, 3]. Усього лиш 8% тоннажу морських суден обладнана для використання альтернативних видів палива, і показники використання альтернативних видів палива на судах залишаються низькими [1]. Таким чином виникає необхідність пошуку інших способів зниження об'ємів викидів. Якщо зміна пального на більш екологічні види є складним і довготривалим процесом, тоді варто прикласти більше зусиль для зменшення використання того, що є наразі доступним.

Найпростішими методами покращення ефективності використання пального є чистка корпусу судна, зменшення швидкості, та оптимізоване прокладання шляху, і також розглядаються методи підтримки руху з допомогою вітру. Проте, зі стрімким розвитком технологій аналізу даних виникли нові способи оптимізації. Судна, які раніше покладались виключно на людські спостереження та рішення тепер створюють величезний об'єм робочих даних. Ця трансформація фундаментально міняє те, як морські компанії керують своїми суднами.

Сьогоднішні судна функціонують як плаваючі дата-центри, збираючи дані з багатьох систем – двигунів, навігаційних систем, лічильників палива та датчиків навколишнього середовища. Впроваджуючи аналітичні системи, транспортні компанії можуть систематично обробляти інформацію замість того, щоб покладатись на інтуїцію. Така зміна в бік прийняття об'єктивних рішень, які базуються на конкретних доказах зменшує операційні ризики та покращує загальні метрики продуктивності.

Тому розробка інтелектуальної системи для аналізу ефективного використання палива на морських судах є актуальною, оскільки паливні витрати становлять значну частку операційних витрат суден, а міжнародні екологічні норми постійно посилюються.

Постановка задачі. Метою цього дослідження є розробка інтелектуальної системи аналізу ефективного використання палива на морських судах, яка дозволяє підвищити якість моніторингу палива за рахунок системного використання комбінації актуальних методів інтелектуального аналізу даних.

Структура інтелектуальної системи

Для розробки інтелектуальної системи аналізу ефективного використання палива на морських судах розроблено її структуру (рис.1) з метою прогнозування загальної кількості спожитого палива. Інформаційна система має модульну архітектуру та складається з взаємопов'язаних підсистем, щоб гарантувати послідовне виконання етапів розв'язку задачі прогнозування.

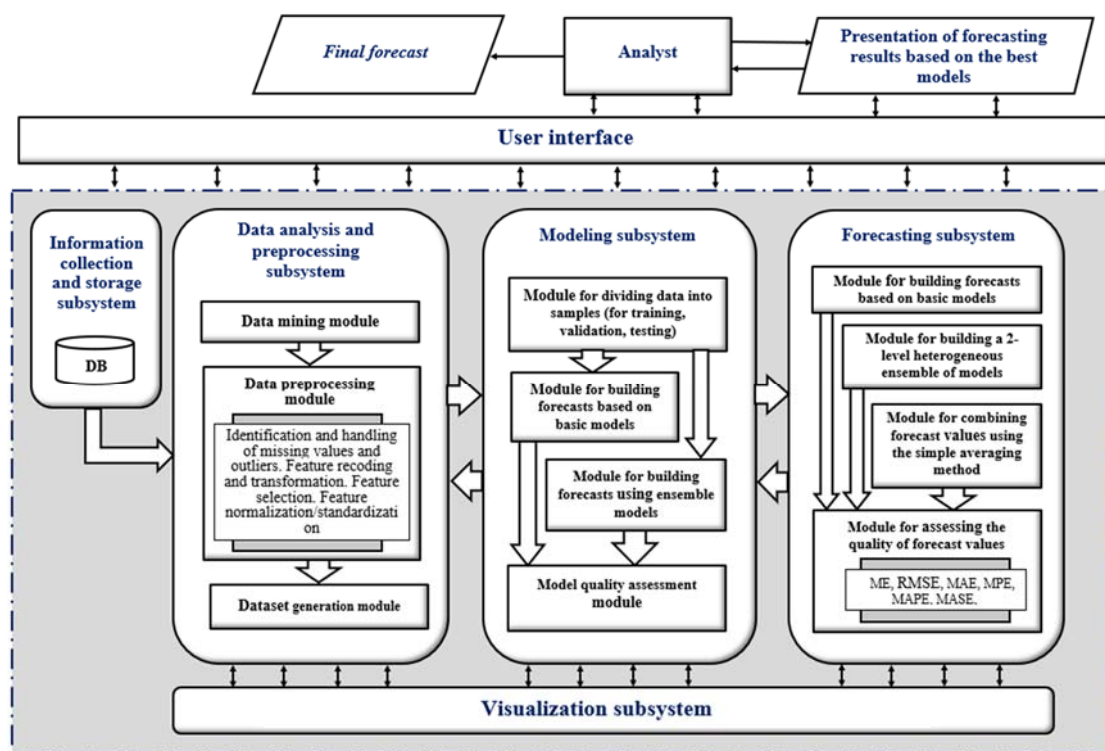


Рис. 1 Структура інтелектуальної системи.

Джерело: сформовано авторами

Підсистема збору та зберігання даних є першим етапом роботи системи. Джерелами інформації можуть бути внутрішні корпоративні системи, відкриті статистичні ресурси, API сервісів або інші інформаційні платформи. Наявність централізованого сховища забезпечує цілісність даних та можливість їх подальшої обробки. Підсистема аналізу та попередньої обробки даних виконує підготовку даних до етапу моделювання. До її складу входить модуль розвідувального аналізу даних, призначений для виявлення структури даних, закономірностей, аномалій та оцінювання статистичних характеристик. Результатом роботи цієї підсистеми є формування підготовленого набору даних для навчання моделі. Підсистема моделювання реалізує процес створення альтернативних прогнозних моделей. На першому етапі відбувається розподіл даних на вибірки, що дозволяє забезпечити коректне навчання та оцінювання моделей. Далі система здійснює побудову прогнозів за допомогою базових моделей та ансамблевих методів, вслід за чим виконується оцінка їх якості. Підсистема прогнозування забезпечує формування кінцевих прогнозних значень. Для оцінювання ефективності прогнозування

використовуються метрики: R2, MSE, RMSE, MAE, MAPE. Застосування різних метрик дозволяє комплексно аналізувати адекватність моделей і якість прогнозів.

В результаті, запропонована архітектура забезпечує комплексний підхід до прогнозування, поєднуючи методи попередньої обробки даних, машинного навчання, ансамблевого моделювання та інтелектуальної аналітики. Модульна структура системи забезпечує її масштабованість, гнучкість та можливість інтеграції нових алгоритмів і джерел даних.

Набір даних та його попередня обробка

Інтелектуальну систему прогнозування загальної кількості спожитого палива було протестовано на наборі даних «Аналіз споживання палива суднами та викидів CO₂», який розміщено на платформі інтелектуального конкурсу та репозиторію *Kaggle*. Цей набір даних спеціально створено для аналізу реалістичних морських операцій у внутрішніх та прибережних водах Нігерії. Набір даних містить 1440 спостережень, кожне з яких описує 10 ключових характеристик одного рейсу. Структурно ці дані поділено на чотири логічні категорії, кожна з яких відіграє певну роль у формуванні моделі функціонування судна. Структура та характеристики всіх атрибутів набору морських телеметричних даних наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Структура та характеристики атрибутів набору даних морської телеметрії

Категорія ознак	Найменування ознаки	Опис та фізичний зміст ознаки
Ідентифікаційні та категоріальні характеристики судна	<i>ship_id</i>	– Унікальний ідентифікатор транспортного засобу;
	<i>ship_type</i>	– Тип судна;
	<i>fuel_type</i>	– Тип палива.
Маршрутні та часові характеристики експлуатації судна	<i>route_id</i>	– Ідентифікатор навігаційного маршруту;
	<i>distance</i>	– Відстань рейсу;
	<i>month</i>	– Місяць здійснення рейсу.
Техніко-експлуатаційні параметри та показники навколишнього середовища	<i>engine_efficiency</i>	– Коефіцієнт корисної дії двигуна;
	<i>weather_conditions</i>	– Рівень штормової активності.
Цільові змінні	<i>fuel_consumption</i>	– Загальна кількість спожитого палива;
	<i>CO2 emissions</i>	– Обсяг викидів вуглекислого газу.

У процесі аналізу набору даних було досліджено структуру телеметричної інформації, визначено типи ознак та проаналізовано статистичні характеристики числових параметрів. Встановлено наявність асиметричних розподілів для ознак *distance*, *fuel_consumption* та *CO2_emissions*, що зумовило необхідність застосування логарифмічної трансформації та подальшої стандартизації даних. Проведено попередню обробку набору даних, яка включала перевірку відсутніх значень, кодування категоріальних змінних із використанням *One-Hot Encoding* та циклічного кодування часових ознак, а також нормалізацію числових параметрів. Виконані перетворення дозволили привести дані до форми, придатної для ефективного навчання моделей машинного навчання. Особливу увагу приділено процедурі відбору ознак. Для цього використано комбінацію методів фільтрації та обгортки, зокрема аналіз кореляції, максимальний інформаційний коефіцієнт та алгоритм *Boruta*. Це дозволило сформувати скорочений набір найбільш інформативних предикторів, здатних забезпечити високу якість прогнозування при зменшенні розмірності простору ознак.

Результати роботи інтелектуальної системи

Для вирішення задачі прогнозування витрат палива обрано наступні моделі машинного навчання: поліноміальну регресію, метод опорних векторів, випадковий ліс та нейромережеві моделі, які відрізняються здатністю моделювати нелінійні залежності та складні взаємозв'язки між параметрами експлуатації судна. Серед альтернативних прогнозних моделей найкраще показники якості отримано по нейромережевої моделі з трансформованою цільовою змінною. Для цієї моделі підібрано значення гіперпараметрів за допомогою методів випадкового та сіткового пошуків.

На етапі аналізу дані розподілені на вибірки по типу морських суден. На рисунку 2 наведено відношення споживання палива до відстані залежно від типу судна. Можна підкреслити, що окремою групою морських суден

є танкери, які тратять більше палива, та їздять на більші дистанції. Візуальна різниця споживання палива привела до побудови окремих альтернативних моделей по типах суден. В таблиці 2 наведено порівняння значень показників якості для нейромережевої моделей, комбінованої моделі та окремих моделей по типах суден.

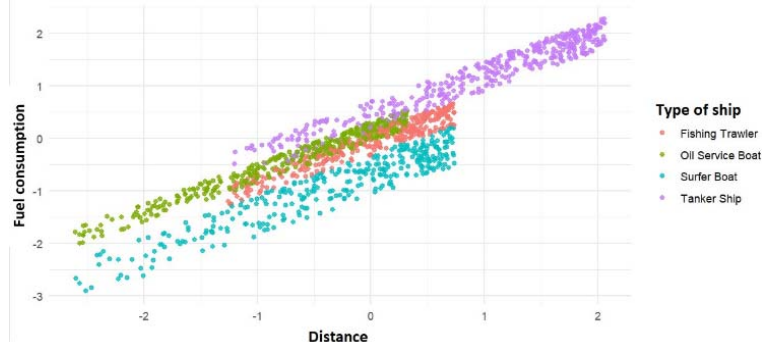


Рис.2 Співвідношення витрати палива до відстані залежно від типу судна.

Джерело: сформовано авторами

Таблиця 2.

Порівняння значень показників якості для нейромережевої моделей, комбінованої моделі та окремих моделей по типах суден

Тип моделі	Метрики якості			
	R^2	RMSE	MAE	MAPE
Нейромережева модель з підібраними параметрами	0,9651	969,15	571,54	11,45%
Комбінування моделей для різних типів суден	0,9630	991,77	582,44	11,73%
Модель на основі вибірки даних про човни для серфінгу	0,8262	340,15	254,99	15,67%
Модель на основі вибірки даних про танкери	0,9032	1770,38	1388,88	12,52%
Модель на основі вибірки даних про човни для нафтоперевезень	0,9384	270,51	217,91	8,44%
Модель на основі вибірки даних про рибальські траулери	0,8864	413,78	344,85	10,89%

Найкращі показники якості прогнозних значень отримано по нейромережевої моделі, яка працює з трансформованою цільовою змінною. Розподіл набору даних на окремі вибірки по типу суден і подальше моделювання на цих вибірках демонструє гірші значення метрик якості прогнозів. Це пов'язано зі значним зменшенням об'єму даних і, у свою чергу з недонавчанням ML моделей. Результат прогнозування перевіряючи результати існуючих відкритих рішень, опублікованих на *Kaggle* в середньому на 3,5%.

Висновки

Запропоновано та обговорено розробка інтелектуальної системи аналізу ефективного використання палива на морських судах. Проведено аналіз еволюції методів контролю витрат палива та встановлено, що використання сучасного апаратного забезпечення не гарантує достовірності даних без застосування інтелектуальних методів обробки даних. Огляд існуючих систем моніторингу показав, що більшість інтелектуальних систем є пропрієтарними, що обґрунтовує доцільність розробки відкритої системи на основі методів машинного навчання.

В експериментальній частині дослідження використано набір даних «Ship Fuel Consumption & CO2 Emissions Analysis». Для аналізу даних розроблено та реалізовано методику попередньої обробки даних, яка включає в себе перевірку пропущених значень, кодування категоріальних ознак, логарифмічну трансформацію для відповідних числових ознак, включно з цільовою змінною, та подальшу z-score нормалізацію. За допомогою методів фільтрації та обгортки, визначено найбільш значущі предиктори: тип судна, тип палива та пройдена дистанція. Доведено, що інші атрибути є надлишковими, та їх видалення покращує узагальнювальну здатність моделі.

Процес моделювання проведено на шести моделях машинного навчання, таких як поліноміальна регресія, нейронна мережа, випадковий ліс, машина опорних векторів для регресії, градієнтний бустинг, та гетерогенні ансамблі. Експериментально встановлено, що найкращі результати демонструє нейронна мережа з архітектурою (64, 32) та параметрами $\alpha = 0.0001$, $\text{learning_rate_init} = 0.001$ та $\text{max_iter} = 1000$. Отримана модель досягла значення коефіцієнта детермінації $R^2 = 0.9651$ на тестових даних, що свідчить про високу здатність моделі до

узагальнення. Даний результат перевершив результати існуючих відкритих рішень, опублікованих на Kaggle в середньому на 3,5%. Проведено додаткові експерименти з дворівневим ансамблем та з навчанням окремих моделей для кожного типу судна. Визначено, що дані методики не покращили результати на даному наборі даних. Таким чином, результати досліджень підтверджують ефективність використання інтелектуальної системи для моніторингу та оптимізації витрат палива у морській галузі.

References

1. “Maritime trade under pressure – growth set to stall in 2025.” UN Trade and Development (UNCTAD). [Online]. Режим доступу: <https://unctad.org/news/maritime-trade-under-pressure-growth-set-stall-2025>.
2. S. Piao, M/-H. Park., S. Yeo, and K. W. Chun, “Expanding the range of ship fuel consumption prediction: A multi-algorithm feature selection approach / Ocean Engineering,” 2025, vol. 316, p. 119944. [Online]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119944>.
3. D. Bisht, “Ship Operating Costs in 2026: Complete Cost Breakdown.” Shipfinex.com. [Online]. Режим доступу: <https://www.shipfinex.com/blog/ship-operating-costs-maritime-vessel-expenses>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.10

Iryna Kalinina,
Olexander Gozhyj

INTELLIGENT FUEL EFFICIENCY ANALYSIS SYSTEM

The development and research of an intelligent system that allows to improve the quality of fuel monitoring on seagoing vessels is presented. The study expands the existing open models of fuel consumption forecasting and offers an alternative to commercial solutions through the systematic use of a combination of current methods of intelligent data analysis. An intelligent system has been implemented that allows to forecast fuel consumption and detect anomalies in the use of fuel and lubricants based on telemetric data. The proposed architecture of the information system provides a systematic approach to forecasting by combining methods of data pre-processing, machine learning, ensemble modelling and intelligent analytics. The modular structure of the system ensures its scalability, flexibility and the ability to integrate new algorithms and data sources. To confirm the effectiveness of the developed information system, experimental studies were conducted using the Ship Fuel Consumption & CO2 Emissions Analysis dataset. The results obtained confirmed the high accuracy of the constructed models and the practical value of the developed approach. It was experimentally established that the highest prediction accuracy is provided by a neural network model with selected parameters ($R^2 = 0.9651$), the results of which surpass existing open solutions on the Kaggle platform. A practical prototype of an intelligent system with a client-server architecture and a mechanism for detecting anomalies in fuel consumption has been created.

Key words: *Intelligent system, fuel consumption, anomalies, machine learning, modelling, forecasting.*

Відомості про авторів/ Information about the Authors

Ірина Калініна, доктор технічних наук, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: irina.kalinina1612@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8359-2045>

Iryna Kalinina, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Intellectual Information Systems, of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: irina.kalinina1612@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8359-2045>

Олександр Гожий, доктор технічних наук, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: alex.gozhyj@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3517-580X>.

Oleksandr Gozhyj, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Intellectual Information Systems, of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: alex.gozhyj@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3517-580X>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.11

Ігор Кандиба,
Микола Фісун

ЗАСТОСУВАННЯ MEDIAPIPE ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СКОНЦЕНТРОВАНOSTІ УВАГИ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ ПІД ЧАС ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

Тези представляють інструментарій для аналізу рівня концентрації уваги здобувачів освіти під час проведення лекційних занять. Авторами розглянуто можливість використання засобів OpenCV та MediaPipe для визначення рівня концентрації уваги. Описано сучасний підхід до аналізу міміки обличчя на основі інструментарію штучного інтелекту. Продемонстровано можливість використання MediaPipe для визначення концентрації уваги здобувачів.

Ключові слова: Python, OpenCV, Mediapipe, штучний інтелект, комп'ютерний зір.

Вагомою проблемою сучасної вищої освіти є освітні втрати. Особливо гострою ця проблема стала під час карантину COVID-19 та повномасштабного вторгнення РФ в Україну. Існує декілька причин виникнення освітніх втрат: повітряні тривоги, що призводять до неможливості проведення аудиторних занять, проблеми з електропостачанням та інтернет-з'єднанням, які ускладнюють чи навіть унеможливають проведення занять онлайн [1].

В умовах постійного зростання освітніх втрат викладачам закладів вищої освіти (ЗВО) дуже складно визначити, яка саме частина матеріалу сприймається здобувачами легко і на якій частині здобувачі починають відволікатися через нерозуміння матеріалу. Контроль рівня залученості здобувачів ускладнює процес проведення лекційного заняття та не дозволяє точно визначити яка частина матеріалу не зрозуміла аудиторії через наявні освітні втрати.

Реалізувати безперервний моніторинг концентрації уваги можливо за допомогою інструментарію комп'ютерного зору, а точніше бібліотеки Open Source Computer Vision Library (OpenCV) та фреймворку MediaPipe. Згаданий інструментарій працює комбіновано. Бібліотека OpenCV реалізує різні алгоритми комп'ютерного зору та дозволяє взаємодію з апаратного забезпеченням для захоплення поточного кадру або відеопотоку з камери. Вбудовані алгоритми OpenCV дозволяють розпізнати наявність певного об'єкту та навіть виділити обличчя, але ця бібліотека вимагає великої кількості обчислювальних ресурсів та не дозволяє розпізнавання емоцій на виділених обличчях.

MediaPipe являє собою кросплатформний фреймворк від Google, розроблений для побудови конвеєрів (pipelines) обробки мультимедійних даних (відео та аудіо). Головна перевага MediaPipe - можливість працювати з складними моделями машинного навчання (ML) у реальному часі навіть на пристроях з обмеженою потужністю (браузери, IoT тощо), використовуючи прискорення GPU. У той же час Mediapipe не підтримує підключення до камери, але реалізує алгоритми для визначення міміки обличчя, рухів рук та тіла [2].

Робота MediaPipe заснована на визначенні координат контрольних точок, що називаються Landmark. Landmark - це специфічна точка на розпізаному об'єкті, яка має порядковий номер і координати в просторі. Кожен об'єкт, що розпізнається Mediapipe, має власну кількість Landmark: у руки визначається 21 точка, для тулуба – 28, а міміка обличчя розпізнається на основі 468 точок.

Варто зазначити, що сучасна версія MediaPipe використовує Tasks API. Tasks API у цьому фреймворку є високорівневим програмним інтерфейсом, призначеним для спрощення інтеграції моделей машинного навчання для роботи з зображеннями. Основною перевагою Tasks API є абстрагування складних процесів побудови графів обробки даних та взаємодії з низькорівневими компонентами MediaPipe, що дозволяє зосередитися безпосередньо на реалізації логіки програмного забезпечення. Це API підтримує широкий спектр завдань комп'ютерного зору та обробки мультимедійних даних, зокрема класифікацію зображень, розпізнавання об'єктів, сегментацію, аналіз жестів, відстеження ключових точок людського тіла та обробку аудіосигналів [3].

Також використання Tasks API забезпечує кросплатформність програмних рішень, за рахунок підтримки операційних систем: Android, iOS, Linux. Важливою перевагою MediaPipe є оптимізація для роботи на пристроях, що мають обмежену обчислювальну потужність, із використанням апаратного прискорення, що є важливим фактором при створенні інтелектуальних систем, які обробляють зображення в реальному часі.

Отже для розпізнавання міміки обличчя та визначення концентрації уваги необхідно інтегрувати натреновану модель машинного навчання, що доступно на офіційному сайті MediaPipe та представлено компанією Google. В мові програмування Python код для підключення та налаштування моделі виглядає наступним чином:

```
model_path = 'face_landmarker.task'  
base_model = python.BaseOptions(model_asset_path=model_path)  
options = vision.FaceLandmarkerOptions(  
    base_options=base_model,  
    running_mode=vision.RunningMode.VIDEO,  
    num_faces=1  
)
```

У представленому коді: `base_model` – об'єкт, що містить завантажену модель, `running_mode` – режим обробки зображень, що при встановленні параметру `vision.RunningMode.VIDEO` налаштовує модель для роботи з кадрами у часовій послідовності. У режимі `VIDEO` алгоритми MediaPipe використовують механізми міжкадрового трекінгу, завдяки яким повторне повне виявлення обличчя виконується не для кожного кадру. MediaPipe дозволяє розпізнати одразу декілька облич, але для цього необхідно задати параметр `num_faces`. Варто зазначити, що збільшення кількості облич, що розпізнаються збільшує необхідну кількість обчислювальної ресурсів.

Просте відображення знайдених ключових точок обличчя можна виконати за допомогою наступного коду:

```
with vision.FaceLandmarker.create_from_options(options) as landmarker:  
    while cap.isOpened():  
        success, frame = cap.read()  
        if not success: break  
        frame = cv2.flip(frame, 1)  
        mp_image = mp.Image(image_format=mp.ImageFormat.SRGB, data=cv2.cvtColor(frame,  
cv2.COLOR_BGR2RGB))  
        timestamp = int(cv2.getTickCount() / cv2.getTickFrequency() * 1000)  
        result = landmarker.detect_for_video(mp_image, timestamp)  
        if result.face_landmarks:  
            for face_landmarks in result.face_landmarks:  
                for landmark in face_landmarks:  
                    x = int(landmark.x * frame.shape[1])  
                    y = int(landmark.y * frame.shape[0])  
                    cv2.circle(frame, (x, y), 1, (0, 255, 0), -1)
```

Використання режиму `VIDEO`, вимагає наявності часової мітки, що у коді реалізована змінною `timestamp`. Ця мітка використовується для визначення точного моменту часу, у який було отримано поточний кадр. Наявність часових міток дозволяє MediaPipe аналізувати послідовність кадрів не як набір незалежних зображень, а як безперервний процес, у якому між сусідніми кадрами існує зв'язок.

Важливо зазначити, що отримання поточного кадру з камери та відображення розмічених точок відповідає бібліотека OpenCV. Ця бібліотека реалізує метод `cv2.imshow` [4], що призначений для відображення діалогового вікна у якому відображається зображення.

Реалізувати визначення концентрації уваги здобувача на парі, на основі розпізнаних ключових точок складна задача. Проте MediaPipe реалізує можливість визначення коефіцієнту деформації обличчя та на основі вбудованого списку цих коефіцієнтів дозволяє визначати певну емоцію. Це реалізується за допомогою методу `face_blendshapes` та списку `category_name`. Наприклад для виявлення закритих очей можна застосувати наступний код:

```
shapes = {s.category_name: s.score for s in result.face_blendshapes[i]}  
if shapes['eyeBlinkLeft'] > 0.4 and shapes['eyeBlinkRight'] > 0.4 :  
    closed_eyes_counters[i] += 1  
else:  
    closed_eyes_counters[i] = 0  
if closed_eyes_counters[i] > (FPS * 1):  
    status = "DANGER: Sleepy!"
```

У той же час використання механізму `face_landmarks` не дозволяє визначати факт втрати концентрації уваги здобувачем. Згаданий коефіцієнт не змінюється при повороті голови, хоча це вказує на втрату уваги. Врахувати цей момент можливо за рахунок розрахунку відстані між кількома контрольними точками на обличчі. Для реалізації розпізнавання цих дій створено окрему функцію:

```
def head_pos(face_landmarks):  
    nose = face_landmarks[4]  
    left_edge = face_landmarks[234]  
    right_edge = face_landmarks[454]  
    dist_left = abs(nose.x - left_edge.x)  
    dist_right = abs(nose.x - right_edge.x)  
    if turn_ratio > 2.0  
        head_status = "Turned RIGHT"  
    elif turn_ratio < 0.5:  
        head_status = "Turned LEFT"  
    return head_status
```

Результат роботи відображається у діалогову вікні згенерованому засобами OpenCV (рис. 1.)

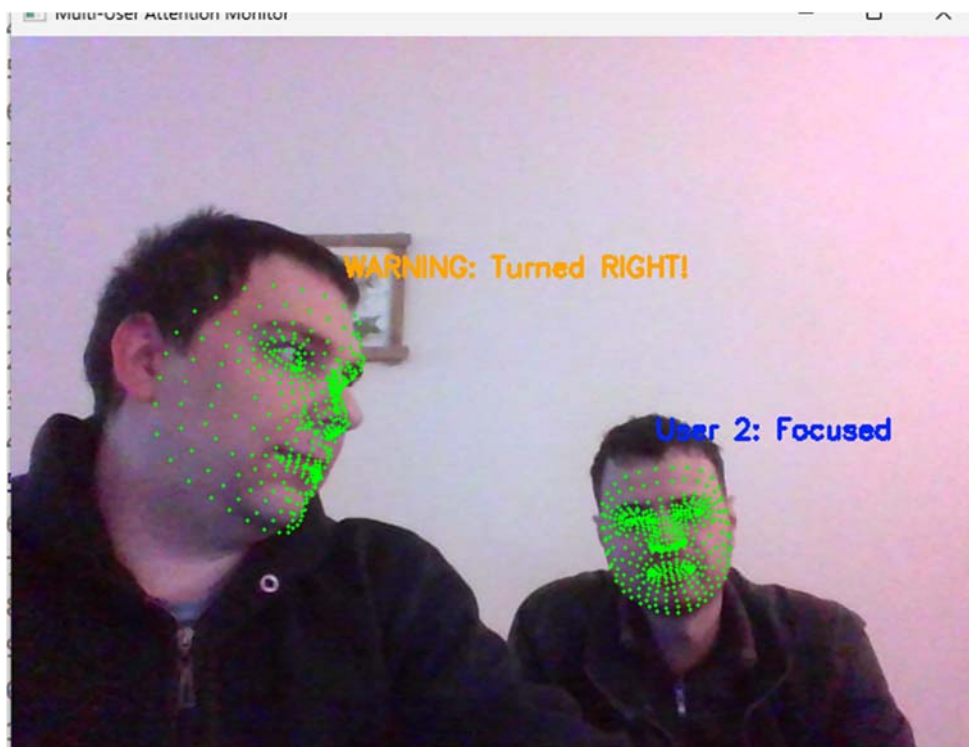


Рис. 1. Інтерфейс відображення втрати уваги здобувачем

Запропоноване програмне забезпечення дозволяє визначати зацікавленість здобувачів та втрату уваги, але його функціонал може бути доповнений функцією розпізнавання обличчя, що дозволить спростити процес контролю відвідуваності і формуванню більш персоналізованого підходу до викладання.

References

1. Боровльова С. Ю., Гончаров Д. С., Горбань Г. В., Кандиба І. О. Виявлення освітніх втрат здобувачів вищої освіти засобами мови програмування Python. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том. 36 (75), № 1. 2025. С. 23–30.
2. Kayış H., Gedizlioğlu Ç. Leveraging point-of-view camera and MediaPipe for objective hyperactivity assessment in preschool ADHD. Frontiers in psychiatry. Vol. 17, 2026. DOI:10.3389/fpsy.2026.1769322.
3. MediaPipe Tasks. URL: <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/tasks> (Accessed 14.05.2026)
4. Gollapudi S. Learn computer vision using OpenCV. Springer, 2019. 151 p.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.11

Ihor Kandyba,
Mykola Fisun

USING MEDIAPIPE TO ASSESS STUDENTS' ATTENTION CONCENTRATION DURING LECTURES

The paper presents a toolkit for analyzing the level of students' attention concentration during lectures. The authors examine the possibility of using OpenCV and MediaPipe to determine the level of attention concentration. A modern approach to facial expression analysis based on artificial intelligence tools is described. The study also demonstrates the possibility of using MediaPipe to assess students' attention concentration.

Key words: Python, OpenCV, Mediapipe, artificial intelligence, Computer Vision.

Відомості про автора / Information about the Author

Ігор Кандиба, PhD, старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ihor.kandyba@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8589-4028>.

Ihor Kandyba, PhD, Senior Lecturer at the Department of Software Engineering, Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ihor.kandyba@chmnu.edu.ua RCID: 0000-0002-8589-4028

Микола Фісун, д-р техн. наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ihor.kandyba@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1297-6230>

Mykola Fisun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ihor.kandyba@chmnu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1297-6230>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.12

Катерина Кірей

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ СИСТЕМ АВТЕНТИФІКАЦІЇ В АРХІТЕКТУРАХ POINT-TO-POINT

У доповіді розглянуто ключові аспекти використання протоколу PPPoE, як фундаментального механізму організації доступу в сучасних мережах операторів телекомунікацій. Зокрема, описано архітектурні особливості взаємодії користувацького обладнання із серверами доступу (NAS) та білінговими системами через протокол RADIUS. Особливу увагу приділено проблемам функціонування систем у високонавантажених режимах (HighLoad), зокрема, навантаженню на центральний процесор у разі декапсуляції пакетів та обмеженням, пов'язаним зі службовими заголовками (MTU Overhead).

Запропоновано програмно-технічні методи оптимізації: використання багатопотокового модуля accel-ppp для підвищення продуктивності обробки сесій, впровадження MSS Clamping для стабілізації TCP-з'єднань та перехід до архітектури Dual Stack (IPv6) для вирішення дефіциту адресного простору. Розроблено рекомендації щодо посилення безпеки на етапі Discovery через впровадження Intermediate Agent та переходу на алгоритми хешування CHAP. Доведено, що глибока інтеграція білінгу з SNMP-моніторингом та механізмами Keep-alive мінімізує похибки тарифікації та спрощує діагностику «останньої милі».

Ключові слова: PPPoE, автентифікація, RADIUS, високонавантажені системи, автоматизована система розрахунків, MTU, інтеграція програмного забезпечення.

Одним із покликань людства є комунікація. Сучасна комунікація переважно ґрунтується на використанні технологій електронних телекомунікацій. Значний стрибок у розвитку цих технологій був зумовлений появою мережі Інтернет. Нині вже можна стверджувати, що мережа Інтернет є невід'ємною складовою комунікації, яка надає доступ до різноманітних сервісів та інформації. В Україні діяльність у сфері телекомунікацій регламентується Законом України «Про електронні комунікації» та низкою нормативних актів. Організацією доступу абонентів до мережі Інтернет займаються оператори електронних телекомунікацій (оператори). Зокрема, до їхніх обов'язків входить організація доступу абонентів до мережі Інтернет. Організація доступу інтегрує в собі процеси авторизації, автентифікації та тарифікації абонентів і має задовольняти певним технічним, користувацьким та законодавчим вимогам. Зокрема, організація доступу користувачів до мережі Інтернет є вельми важливим питанням, що потребує ретельного розгляду переваг та обмежень певної технології.

У доповіді розглянуто можливі шляхи оптимізації високонавантажених систем автентифікації в архітектурах Point-to-Point на прикладі автоматизованої системи розрахунків (АСР), детальний опис якої розглянуто в роботах [1-2]. АСР ґрунтується на використанні протоколу PPPoE (Point-to-Point Protocol over Ethernet) [3], як одного з основних методів організації доступу користувачів до мережі Інтернет.

У взаємодії клієнта із системою АСР можна виділити три складові: авторизація, автентифікація та облік. Авторизація – це валідація тільки логіну та пароллю. Цей процес використовує мінімальний обсяг обчислювальних ресурсів. Далі виконується автентифікація за результатами якої створюється PPPoE-з'єднання згідно з налаштуваннями АСР (швидкість доступу, обмеження доступу тощо). Для отримання доступу до Інтернету абоненту необхідно налаштувати своє обладнання на PPPoE-авторизацію.

У доповіді виокремлено переваги та слабкі сторони PPPoE-авторизації. До переваг PPPoE-авторизації можна віднести: можливість індивідуального контролю та тарифікації; економічну ефективність; простоту технічної реалізації з боку користувача; підтримку механізмів авторизації, автентифікації та обліку (Authorization, Authentication and Accounting, AAA); гнучкість автентифікації; можливість динамічного керування ресурсами.

Індивідуальний контроль та тарифікація. Протокол PPPoE дає змогу здійснювати контроль доступу, облік роботи (білінг) та вибір типу обслуговування для кожного окремого користувача, а не для всього сайту (локальної мережі) загалом.

Економічна ефективність та простота впровадження. Протокол PPPoE дає змогу об'єднати велику кількість хостів (комп'ютерів, телевізорів, телефонів тощо) на боці абонента через один простий пристрій доступу (маршрутизатор) з допомогою стандартної мережі Ethernet. Також тут треба зазначити, що ця технологія орієнтована на використання недорогих клієнтських пристроїв доступу, отже, має низьку вартість обладнання. Для кінцевого користувача процедура підключення є максимально спрощеною і часто не потребує складних конфігурацій (можливість «zero-configuration»).

Підтримка механізмів AAA. PPPoE ефективно взаємодіє з RADIUS-серверами для централізованої автентифікації, авторизації та збору даних про використані ресурси (час, трафік). Наявна можливість перевірки якості каналу – протокол містить механізми LCP (Link Control Protocol) для конфігурації та перевірки якості зв'язку, а також виявлення помилок. А також підтримує різні схеми автентифікації, такі як PAP (Password Authentication Protocol) та CHAP (Challenge Handshake Authentication Protocol), що забезпечує гнучкість у разі налаштування безпеки.

Динамічне керування ресурсами. Протокол підтримує автоматичне присвоєння IP-адрес, управління мережевими адресами та мультимплексування протоколів. Використання механізму Discovery дає змогу хосту самостійно знайти концентратор доступу (NAS) у мережі, визначити його MAC-адрес та створити унікальний ідентифікатор сесії (SESSION_ID). Після встановлення зв'язку створюється віртуальний інтерфейс PPP, що дає змогу ізолювати трафік користувача та точно фіксувати час початку (acct_type=start) та завершення (acct_type=stop) роботи в мережі для потреб тарифікації. Отже, білінг має можливість призначати різні типи обслуговування (швидкість, пріоритет трафіку) для кожної окремої сесії.

Ці переваги роблять протокол PPPoE ефективним інструментом реалізації процесів AAA. Проте разом із перевагами треба зазначити кілька слабких сторін використання PPPoE та запропонувати конкретні шляхи їхнього нівелювання в межах білінгової системи.

Проблема «MTU Overhead» (Службові заголовки). Стандартний розмір кадру Ethernet становить 1500 байт. PPPoE додає свій заголовок (6 байт) та ID сесії (2 байти), що зменшує корисний обсяг даних (MTU) до 1492 байт. Це може призводити до того, що деякі сайти або сервіси не відкриватимуться, оскільки пакети більшого розміру будуть відкидатися без фрагментації. Тут одним із можливих шляхів вирішення може бути налаштування MSS (Maximum Segment Size) Clamping на мережевому шлюзі (NAS). Це змушує TCP-з'єднання автоматично домовлятися про менший розмір пакетів, що проходять крізь тунель.

Отже, якщо розроблюється модуль для білінгу або мережевий сервіс, необхідно враховувати, що ігнорування ICMP-повідомлень призведе до нестабільної роботи програми в клієнтів з PPPoE-підключенням. Правильна обробка цих службових повідомлень (зокрема, ICMP «Fragmentation Needed») через механізм Path MTU Discovery гарантує, що дані будуть адаптовані під можливості каналу програмно або на рівні мережевого стека операційної системи ще до того, як вони будуть безповоротно відкинуті мережею.

Проблема навантаження на центральний процесор (CPU Intensive) полягає в тому, що на відміну від стандартної маршрутизації (IPoE), протокол PPPoE вимагає додаткових обчислювальних ресурсів для операцій інкапсуляції та декапсуляції кожного пакету на стороні сервера доступу (NAS). У разі великої кількості сесій та високій пропускній здатності каналів (від 1 Гбіт/с) це призводить до надмірного навантаження на механізми переривань процесора (SoftIRQ). Для вирішення цієї проблеми доцільно використовувати багатопотокові модулі обробки (наприклад, accel-ppp для Linux), які дають змогу програмно розподіляти контексти обробки пакетів між різними ядрами CPU, уникаючи перевантаження одного ядра. Також ефективним є перехід на спеціалізовані апаратні рішення (BRAS/BNG) від провідних вендорів (Cisco, Juniper, Nokia). У таких системах обробка тунелів реалізована на рівні спеціалізованих мікросхем (ASIC), що звільняє центральний процесор від рутинних операцій обробки трафіку та дає змогу йому зосередитися на логіці керування сесіями.

Процес встановлення зв'язку в PPPoE починається з пакету PADI (Active Discovery Initiation), який працює як ширококомовна розсилка (Broadcast), це створює вектори для атак. Зловмисник може генерувати тисячі фейкових запитів на авторизацію, спричиняючи відмову в обслуговуванні (DoS) або переповнення таблиць комутаторів (CAM-table). Крім того, є ризик розгортання «піратського» сервера (Rogue PPPoE Server) для перехоплення облікових даних. Для мінімізації цих ризиків у програмно-технічному комплексі доцільно впровадити такі заходи:

- використання PPPoE Intermediate Agent, ця функція на рівні комутаторів додає до запиту унікальну мітку порту (Circuit-ID). Це дає змогу програмному модулю білінгу на етапі авторизації точно ідентифікувати точку підключення та блокувати несанкціоновані запити;

- апаратна фільтрація та Port Security, налаштування обмежень на кількість MAC-адресів на порту та фільтрація PADI-пакетів для запобігання переповненню ресурсів мережевого обладнання;

– програмна реалізація протоколу CHAP, повна відмова від протоколу PAP на користь CHAP. Завдяки використанню алгоритмів хешування, CHAP запобігає передачі паролів у відкритому вигляді, роблячи перехоплення даних у мережі неефективним.

Оскільки кожна PPPoE-сесія є з'єднанням типу «точка-точка», вона вимагає виділення унікального IP-адреса для кожного активного інтерфейсу. У разі великої бази користувачів це призводить до критичного дефіциту адресного простору IPv4. Для вирішення цієї проблеми в межах програмного комплексу пропонуються такі підходи. Впровадження технології CGNAT (Carrier-Grade NAT) – програмне керування на боці білінгової системи динамічними пулами приватних адрес, що дає змогу сотням абонентів одночасно використовувати один публічний IPv4-адрес. У такому разі ПЗ білінгу має забезпечувати ведення детальних логів трансляцій для ідентифікації користувачів. Реалізація механізму Dual Stack (IPv6) – паралельне впровадження протоколу IPv6, що підтримується сучасними програмними реалізаціями PPPoE, дає змогу програмно призначати абонентам префікси IPv6 (через RADIUS-атрибути), забезпечуючи поступовий перехід від дефіцитного IPv4 до практично необмеженого адресного простору.

Також треба звернути увагу на проблему складності діагностики «останньої милі». Оскільки PPPoE функціонує як віртуальний тунель, стандартні методи діагностики мережевого рівня (наприклад, аналіз ARP-таблиць) не дають змоги отримати дані про фізичний стан лінії абонента до моменту встановлення сесії. Для подолання цієї обмеженості в архітектурі системи можна впровадити такі програмні рішення. Глибока інтеграція білінгової системи з протоколом SNMP, що полягає в розробленні програмних сервісів для автоматичного збору метрик безпосередньо з портів комутаторів доступу. Це дає змогу системі в реальному часі відображати стан фізичного з'єднання (Link Up/Down) в інтерфейсі адміністратора незалежно від стану PPPoE-сесії. А також використання механізму Keep-alive (LCP Echo Request/Reply) – програмне налаштування періодичних запитів для перевірки цілісності тунелю. Це дає змогу серверу доступу (NAS) оперативно виявляти розриви зв'язку та ініціювати програмне завершення «завислих» сесій у білінгу, забезпечуючи точність фінансового обліку та коректність статусів користувачів у системі.

Запропоновані заходи перетворюють PPPoE з «протоколу минулого» на надійний промисловий стандарт. Найбільш критичним та ефективним кроком є впровадження MSS Clamping (для комфорту користувача) та accel-ppp (для стабільності сервера). Впровадження ідентифікації за портами (Intermediate Agent) є обов'язковим для мереж середнього та великого розміру для запобігання хаосу в авторизації.

References

1. Kirei, K. O. (2023). Vdoskonalennia systemy kontroliu, obliku ta dostupu do merezhi internet abonentiv operatora telekomunikatsii [Improvement of the system of control, accounting and access to the Internet for subscribers of a telecommunications operator]. *Computer Science and Applied Mathematics*, (1), 26–35 [in Ukrainian]
2. Kirei, K. O. (2024). Optymizatsiia protsesu avtentyfikatsii, avtoryzatsii ta obliku z vykorystanniam RADIUS protokolu [Optimization of the process of authentication, authorization and accounting using the RADIUS protocol]. *Nauka i tekhnika sohodni. Seriya: Tekhnika – Science and technology today*. Series: Engineering, (2), 818–828. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-2\(30\)-818-828](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-2(30)-818-828) [in Ukrainian]
3. Point-to-Point Protocol over Ethernet. (2026, April 14). In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Point-to-Point_Protocol_over_Ethernet

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.12

Kateryna Kirei

OPTIMIZATION OF HIGH-LOAD AUTHENTICATION SYSTEMS IN POINT-TO-POINT ARCHITECTURES

The report examines the key aspects of using the PPPoE protocol as a fundamental mechanism for organizing access in modern telecommunications operator networks. Specifically, it describes the architectural features of the interaction between customer premises equipment (CPE), network access servers (NAS), and billing systems via the RADIUS protocol. Special attention is paid to the challenges of system operation in high-load modes (HighLoad), including CPU load during packet decapsulation and constraints related to service headers (MTU Overhead).

The study proposes software and technical optimization methods: the use of the multi-threaded accel-ppp module to improve session processing performance, the implementation of MSS Clamping to stabilize TCP connections, and the transition to a Dual Stack (IPv6) architecture to address the shortage of address space. Recommendations have been

developed to enhance security at the Discovery stage through the implementation of an Intermediate Agent and the transition to CHAP hashing algorithms. It is demonstrated that deep integration of billing with SNMP monitoring and Keep-alive mechanisms minimizes charging errors and simplifies "last mile" diagnostics.

Key words: *PPPoE, authentication, RADIUS, high-load systems, automated billing system, MTU, software integration.*

Відомості про автора / Information about the Author

Катерина Кірей, кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: kateryna.kirey@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9338-2380>

Kateryna Kirei, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: kateryna.kirey@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9338-2380>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.13

Олександр Ковалів,
Євген Сіденко,
Галина Кондратенко

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ЕПІДЕМІЧНИХ РИЗИКІВ У НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ

Тези присвячено обґрунтуванню концептуальної моделі інформаційної технології прогнозування та класифікації епідемічних ризиків у нестационарних умовах. Актуальність дослідження зумовлена тим, що динаміка поширення інфекційних захворювань може змінюватися під впливом зовнішніх факторів, структурних зсувів, нерегулярних сплесків захворюваності та порушень у системі реєстрації даних.

Запропонована модель поєднує етапи збирання й підготовки епідеміологічних даних, аналізу ознак нестационарності, формування вхідного простору прогнозу моделі, побудови прогнозу та класифікації рівня епідемічного ризику. Наявний адаптивний контур оновлення, який забезпечує перегляд даних, ознак і параметрів моделі у разі зміни характеру епідемічного процесу. Практичне значення підходу полягає у можливості перетворення числових прогнозів на інтерпретовані рівні ризику для підтримки управлінських рішень у сфері громадського здоров'я.

Ключові слова: Інфекційні захворювання, прогнозування, епідемічний ризик, нестационарні умови, інформаційна технологія.

Прогнозування поширення інфекційних захворювань особливої актуальності набуває для України, де на динаміку інфекційної захворюваності впливають не лише природні епідемічні закономірності, а й наслідки воєнних дій, міграція населення, порушення доступу до медичної допомоги, зміни в роботі системи епідеміологічного нагляду та інші зовнішні фактори [1-2].

За таких умов епідемічні процеси стають менш передбачуваними, а часові ряди захворюваності можуть містити структурні зсуви, нерегулярні сплески, зміну сезонності та порушення стабільності реєстрації випадків. Це ускладнює застосування класичних методів прогнозування, які часто спираються на припущення про відносну сталість статистичних властивостей досліджуваного процесу.

Сучасні методи машинного навчання та нейронні мережі надають нові можливості для аналізу складних часових залежностей, зокрема у випадках, коли дані характеризуються нелінійністю, високим рівнем шуму та нестабільністю [3-4]. У задачах прогнозування часових рядів активно застосовуються різні архітектури нейромереж, наприклад, модель N-BEATS в [5] була запропонована як універсальна нейромережева архітектура для інтерпретованого прогнозування часових рядів, здатна моделювати трендові та сезонні компоненти без жорсткого попереднього задання їх форми. Але підвищення точності прогнозування не завжди досягається лише за рахунок ускладнення архітектури моделі. Для епідеміологічних часових рядів важливим є не тільки вибір алгоритму прогнозування, а й формування інформативного вхідного простору. Поширення інфекційних захворювань залежить від багатьох чинників, серед яких сезонність, демографічні зміни, мобільність населення, стан медичної інфраструктури, соціальні обмеження, кліматичні та екологічні умови. Тому використання лише попередніх значень цільового часового ряду може бути недостатнім для якісного прогнозування в нестационарних умовах.

Одним із перспективних підходів є інтеграція екзогенних змінних у прогнозні моделі. Екзогенні змінні відображають зовнішні фактори, що впливають на цільовий процес, але не є його внутрішніми значеннями. Однак у задачах епідеміологічного прогнозування залишається актуальною проблема не лише додавання зовнішніх змінних, а й їх раціонального відбору, оскільки надлишкові або слабо інформативні ознаки можуть збільшувати шум і знижувати стабільність моделі.

Тому перехід від окремої прогнозувальної моделі до концептуальної моделі інформаційної технології, яка поєднує збирання та попередню обробку даних, виявлення нестационарних змін, прогнозування поширення інфекційних

захворювань, оптимізацію вхідного простору та класифікацію рівнів епідемічного ризику є доцільним. Такий підхід дозволяє розглядати прогнозування не як ізольовану обчислювальну задачу, а як частину цілісного процесу підтримки прийняття рішень у сфері громадського здоров'я.

Це створює основу для подальшої розробки програмних засобів епідеміологічного моніторингу, аналітичних панелей та інших інструментів підтримки управлінських рішень.

З урахуванням нестаціонарного характеру епідеміологічних часових рядів, впливу зовнішніх факторів та необхідності інтерпретації прогнозних результатів для практичного використання доцільно розглядати не окрему модель прогнозування, а цілісну інформаційну технологію. Така технологія має забезпечувати повний цикл роботи з даними: від збирання та підготовки первинної інформації до формування прогнозу, оцінювання його якості, класифікації рівня епідемічного ризику та подальшого оновлення моделі у разі зміни характеру епідемічного процесу.

Узагальнену структуру інформаційної технології прогнозування та класифікації епідемічних ризиків у нестаціонарних умовах наведено на рисунку 1.

Запропонована концептуальна модель поєднує кілька взаємопов'язаних рівнів. На початковому рівні здійснюється інтеграція епідеміологічних, демографічних, календарних, сезонних та інших зовнішніх даних. Далі ці дані проходять етапи перевірки якості, узгодження часової шкали, нормалізації та формування навчальних вибірок. Аналітична частина моделі передбачає виявлення ознак нестаціонарності, формування вхідного простору прогновної моделі, вибір релевантних ознак, побудову прогнозу та порівняння прогнозних сценаріїв.

У запропонованій моделі наявний рівень оцінювання та класифікації ризику, призначення якого полягає у перетворенні числових прогнозних значень на узагальнену оцінку епідемічної ситуації, яка може бути подана у вигляді рівнів ризику. Це підвищує практичну цінність прогнозування, оскільки результати стають більш придатними для використання в системах підтримки прийняття управлінських рішень у сфері громадського здоров'я.

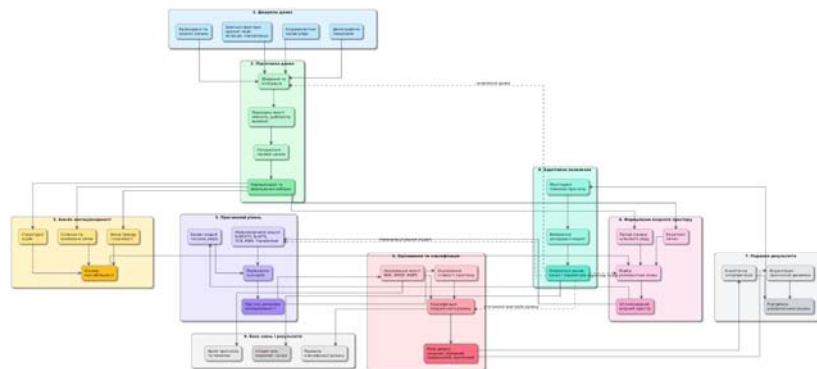


Рис. 1. Багаторівнева концептуальна модель інформаційної технології прогнозування та класифікації епідемічних ризиків у нестаціонарних умовах.

Джерело: сформовано автором

В моделі наявний адаптивний контур оновлення, який забезпечує моніторинг похибки прогнозу, виявлення деградації якості моделі, перегляд складу вхідних ознак, уточнення критеріїв класифікації ризику та переналаштування прогнозної моделі.

Наведена модель узагальнює логіку побудови інформаційної технології, у якій прогнозування поширення інфекційних захворювань поєднується з аналізом нестаціонарності та класифікацією епідемічного ризику. Її відмінність полягає в тому, що прогноз розглядається не як кінцевий результат сам по собі, а як проміжна аналітична основа для подальшої оцінки рівня загрози та підтримки прийняття рішень.

Запропонована структура дозволяє формалізувати перехід від первинних епідеміологічних даних до інтерпретованих результатів, придатних для практичного використання. Саме тому, концептуальна модель виступає проміжною ланкою між теоретичними методами прогнозування часових рядів і майбутньою програмною реалізацією інформаційної технології. Вона визначає основні функціональні компоненти, інформаційні зв'язки між ними та напрям подальшої експериментальної перевірки запропонованого підходу.

В результаті даної роботи обґрунтовано доцільність розроблення концептуальної моделі інформаційної технології прогнозування та класифікації епідемічних ризиків у нестаціонарних умовах. Запропонований підхід дозволяє перейти від використання окремих прогнозних моделей до цілісної технологічної структури, яка поєднує підготовку даних, аналіз нестаціонарності, формування вхідного простору, прогнозування динаміки інфекційних захворювань та класифікацію рівня епідемічного ризику.

References

1. Goniewicz, K., Burkle, F.M., Horne, S., Borowska-Stefańska, M., Wiśniewski, S., Khorram-Manesh, A. (2021). The Influence of War 628 and Conflict on Infectious Disease: A Rapid Review of Historical Lessons We Have Yet to Learn. *Sustainability*, 13(19), 629 10783. <https://doi.org/10.3390/su131910783> [in English].
2. Daw, M.A. (2021). The Impact of Armed Conflict on the Epidemiological Situation of COVID-19 in Libya, Syria and Yemen. *Front. 637 Public Health* 9, 667364. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.667364> [in English]
3. Ahmed S., et al., (2023) Transformers in Time-Series Analysis: A Tutorial, *Circuits Syst Signal Process* 42, 7433–7466. <https://doi.org/10.1007/s00034-023-02454-8>. [in English]
4. Stepashko V., Zosimov V. (2017). Numerical study of the generalized iterative algorithm GIA GMDH with active neurons, in: 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, pp. 496-500. <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2017.8098836>. [in English]
5. Kovaliv, O., Kondratenko, Y., Sidenko, I., Kondratenko, G., & Chumachenko, D. (2026). Improving the Accuracy of Infectious Disease Forecasts Based on Comparing Neural Network Architectures. *Computation*, 14(2), 54. <https://doi.org/10.3390/computation14020054>. [in English]

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.13

Oleksandr Kovaliv,
Ievgen Sidenko,
Galyna Kondratenko

CONCEPTUAL MODEL OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR FORECASTING AND CLASSIFICATION OF EPIDEMIC RISKS UNDER NON-STATIONARY CONDITIONS

The theses are devoted to the substantiation of a conceptual model of information technology for forecasting and classifying epidemic risks under non-stationary conditions. The relevance of the study is determined by the fact that the dynamics of infectious disease spread may change under the influence of external factors, structural shifts, irregular morbidity outbreaks, and disruptions in the data registration system.

The proposed model combines the stages of collecting and preparing epidemiological data, analyzing signs of non-stationarity, forming the input space of the forecasting model, generating forecasts, and classifying the level of epidemic risk. It includes an adaptive update loop that ensures the revision of data, features, and model parameters when the nature of the epidemic process changes. The practical significance of the approach lies in the possibility of transforming numerical forecasts into interpretable risk levels to support managerial decision-making in the field of public health.

Keywords: *Infectious diseases, forecasting, epidemic risk, non-stationary conditions, information technology.*

Відомості про авторів / Information about the Authors

Олександр Ковалів, аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем в Чорноморському національному університеті імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: kizutoamazed@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0001-2047-6319>.

Oleksandr Kovaliv, PhD student of the Intelligent Information Systems Department at Petro Mohyla Black Sea National University (PMBSNU), Mykolaiv, Ukraine. E-mail: kizutoamazed@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0001-2047-6319>.

Євген Сіденко, канд. техн. наук, завідувач кафедри інтелектуальних інформаційних систем в Чорноморському національному університеті імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ievgen.sidenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6496-2469>.

Ievgen Sidenko, PhD, Head of the Intelligent Information Systems Department at Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ievgen.sidenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6496-2469>.

Галина Кондратенко, канд. техн. наук, доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем в Чорноморському національному університеті імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: halyna.kondratenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8446-5096>.

Galyna Kondratenko, PhD, Associate Professor of the Intelligent Information Systems Department at Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: halyna.kondratenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8446-5096>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.14

Микита Колесніков

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ МУЗИЧНОГО КОНТЕНТУ, СТВОРЕНОГО З ВИКОРИСТАННЯМ ІНСТРУМЕНТІВ ШІ

Тези присвячені комплексному аналізу сучасних методів ідентифікації музики, генерованої нейромережами, систематизації їх за функціональними групами та обґрунтуванню архітектури інтегрованої багатоваріаційної системи автоматичного виявлення AI-контенту на цифрових стрімінгових платформах із застосуванням методів машинного навчання.

Ключові слова: штучний інтелект, генеративна музика, спектральний аналіз, стереополе, BPM, водяні знаки, мультимодельний ансамбль, детекція, нейромережа.

Стрімкий розвиток генеративних нейромереж упродовж 2023-2026 років кардинально змінив музичну індустрію. Інструменти на кшталт Suno, Producer.ai, MusicGen, Riffusion та ElevenLabs Music дозволяють будь-якому користувачеві без знань музичної теорії та спеціального обладнання створити повноцінний музичний твір за хвилини, лише прописавши декілька рядків інструкції. Демократизація музичного виробництва відкрила нові творчі можливості, однак одночасно породила системні загрози для галузі.

За даними Deezer (листопад 2025 року), щодня на платформу завантажується близько 50 000 повністю створених ШІ музичних треків, що становить приблизно 34% від усіх нових завантажень [1]. На YouTube Music дослідження аудиторії зафіксували, що шість із десяти рекомендацій у персональній стрічці можуть бути творами ШІ від невідомих авторів із генеричними назвами. Spotify у 2025 році видалив 75 мільйонів треків, позначених як спам або контент низької якості, значну частину яких складала масово завантажена синтетична музика.

Масштаб проблеми зумовлений кількома чинниками. По-перше, недобросовісні юзери використовують ШІ для генерації великої кількості треків з метою штучного накручування кількості прослуховувань та маніпуляцій в системі отримання роялті, які мали б надходити до авторів живої музики. По-друге, відсутність маркування AI-контенту дезорієнтує слухачів та руйнує культуру автентичного музичного споживання [2]. По-третє, авторське право у сфері AI-музики залишається юридично невизначеним: у жовтні 2025 року ASCAP, BMI та SOCAN оголосили про початок реєстрації частково AI-генерованих творів, однак повністю машинні твори досі не підпадають під захист [3]. Це вимагає технологічних інструментів для чіткого розмежування між людською та машинною творчістю. Відсутність єдиного галузевого стандарту виявлення AI-контенту та недостатня теоретична систематизація існуючих підходів обумовлюють актуальність дослідження.

Аналіз наукової літератури, технічної документації детекторів та практичних підходів дозволив систематизувати методи виявлення такого контенту за чотирма функціональними групами: акустичні маркери, спектральні та нейромережеві методи, цифрові водяні знаки, поведінкові алгоритми.

Група 1 – акустичні маркери. Плаваючий темп (BPM Drift) є одним із фундаментальних акустичних маркерів AI-музики. Навіть коли у запиті до нейромережі явно вказано конкретне значення темпу (наприклад, 175 BPM), алгоритм генерації не витримує його рівномірно протягом усього треку. Аналіз сітки ударних інструментів виявляє мікро-відхилення: замість стабільних 175 BPM реальний темп плавно коливається в межах $\pm 0,2-0,5$ BPM. Для електронних жанрів (drum and bass, techno, house), де темп свідомо квантизується до сотих долей, подібне відхилення є значущим маркером, оскільки живий виконавець при роботі з DAW встановлює жорстку темпову сітку. Водночас слід зазначити, що жива акустична музика також природно має плаваючий темп (rubato, людський groove), тому цей, критерій, звичайно, є вагомим, але не вирішальним сам по собі.

Фазові проблеми та стереополе є одними із найважливіших технічних критеріїв для виявлення синтетичного твору. Принципова відмінність між AI-генерацією та традиційним зведенням полягає в загальному підході до роботи: нейромережа створює трек цілісно з «білого шуму», тоді як звукоінженер працює із сукупністю окремих доріжок, кожна з яких панорує та обробляє незалежно. Наслідком цього є вже звичайна для штучної музики проблема стереополя. Суть полягає в тому, що при декодуванні аудіосигналу у формат Mid/Side (M/S), де M =

$(L+R)/2$ відповідає моно-сумі, а $S = (L-R)/2$ – стерео-різниця, Side-канал синтетичної мелодії звучить, як нерозбірлива звукова какофонія без чіткого просторового позиціонування інструментів. При якісному зведенні руками людини – кожен інструмент займає визначену позицію у стереополі, а Side-канал при ізольованому прослуховуванні залишається музично читабельним.

Неприродний зріз високих частот виявляється при аналізі спектрограми. У виворах ШІ спостерігається дуже різкий спад частотного вмісту вище 18-20 кГц, що проявляється навіть у форматах без втрат (WAV, FLAC, AIFF). Така характеристика пояснюється архітектурою нейронних вокодерів – компонентів генеративної системи, які перетворюють внутрішні латентні вектори на аудіосигнал. Вокодери оптимізовані для відтворення частот, можливих для людського сприйняття (до 20 кГц), і не моделюють надвисокі частоти, які природно присутні в аналоговому записі та якісному цифровому зведенні. На спектрограмі це виглядає як штучно обрізана «стеля» замість плавного натурального спаду.

Група 2 – спектральні та нейромережеві методи. Дослідження 2025 року, опубліковане в Transactions of the International Society for Music Information Retrieval, показало, що нейронні вокодери залишають характерні спектральні артефакти переважно у діапазоні вище 12 кГц. Принципово важливим результатом є те, що навіть відносно простий класифікатор, наприклад логістична регресія з лише 10 000 параметрів – досягає точності понад 99% при виявленні цих артефактів у чистих файлах. Це свідчить про те, що спектральний «відбиток» синтетичної генерації є стійким та відносно легким для визначення за сприятливих для цього умов.

Метод мультимодельного ансамблю (Multi-model Ensemble Detection) є більш складним, але й значно надійнішим підходом. Замість одного класифікатора система запускає N спеціалізованих нейронних мереж паралельно – по одній, навченій розпізнавати «відбиток» кожної конкретної ШІ-платформи (Suno, Producer.ai, MusicGen, ElevenLabs тощо). Кожна мережа i повертає ймовірність $p_i = P(AI_i | x)$, де x – вектор аудіоознак. Мета-класифікатор агрегує ці ймовірності:

$$P_{AI} = f(p_1, p_2, \dots, p_N), \quad p_i = P(AI_i | x)$$

Інструмент authio реалізує цей підхід із 12 спеціалізованими нейронними мережами, декларуючи точність 99,42% та хибнопозитивний показник менше 0,6% [4]. Аналогічний підхід використовує IRCAM Amplify із заявленою точністю 99% та продуктивністю понад 250 000 треків на годину. Платформа ACRCLOUD аналізує повний музичний твір, ізольований вокал та акомпанемент окремо, що підвищує надійність класифікації для музики зі складним аранжуванням. В той же час обмеженням даного методу є «концептуальний дрейф», коли поява нових версій генеративних моделей вимагає регулярного перенавчання класифікаторів, оскільки спектральні «відбитки» моделей змінюються з кожним оновленням.

Група 3 – цифрові водяні знаки. Відповідно до вимог Регламенту ЄС про штучний інтелект (EU AI Act), генеративні системи, що виробляють медіаконтент, зобов'язані вбудовувати у вихідні файли машиночитані мітки – цифрові водяні знаки [5]. Google реалізував цей підхід у вигляді технології SynthID для своєї музичної моделі Lyria: система використовує фазове кодування у частотно-часовій області для вбудовування зашифрованого паттерну, нечутного для людського вуха [6]. Особливістю таких водяних знаків є висока стійкість до стандартної постобробки: еквалізація, зміна тональності, нормалізація гучності та навіть помірне перекодування не руйнують закодованого патерну, оскільки він вбудований у глибинну структуру сигналу, а не в його поверхневі характеристики. В деяких випадках, такий водяний знак може ідентифікувати не лише факт «синтетичності», але й конкретну модель ШІ та сесію користувача.

Група 4 – поведінкові алгоритми та аналіз метаданих. Окрім аналізу аудіосигналу, цифрові платформи використовують поведінкові сигнали на рівні акаунту та метаданих. Масове завантаження є першочерговою ознакою – акаунт, що завантажує понад 50-100 треків на добу з ідентичними або типовими обкладинками, сформованими нейромережею для візуалізації, автоматично позначається як підозрілий. Додатковими сигналами є: відсутність творчої біографії автора, однотипна структура назв треків, відсутність коментарів до творчого процесу, нульова або штучно накручена активність аудиторії. Поведінковий аналіз не є самостійним методом для аналізу, але в поєднанні з аудіо-маркерами суттєво підвищує загальну точність системи та дозволяє знизити обчислювальне навантаження шляхом пріоритизації «підозрілих» акаунтів для глибокого аудіоаналізу.

На основі систематизованих методів пропонується архітектура багатоваріантної конвеєрної системи виявлення творів ШІ, яка інтегрує всі чотири групи методів у єдиний аналітичний конвеєр (рис. 1, табл. 1).

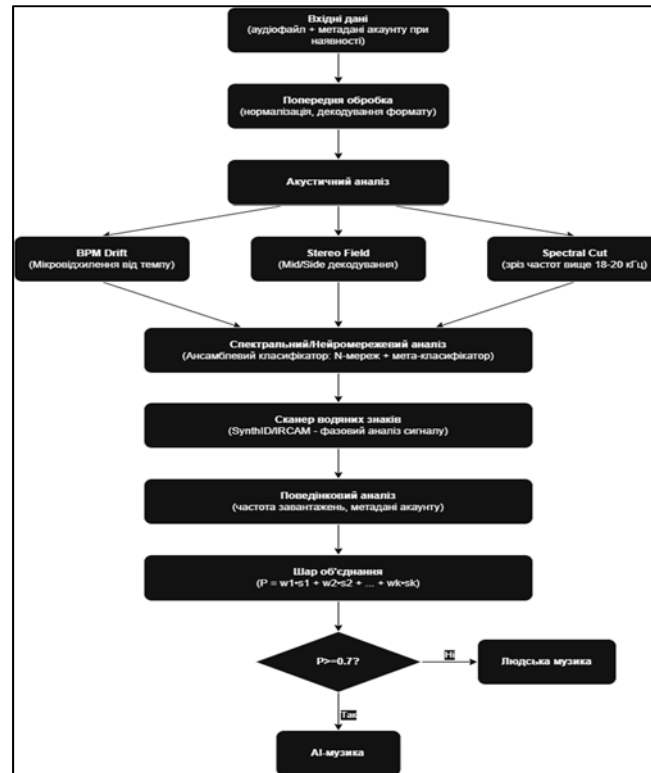


Рис. 1 Схема конвеєрної системи виявлення синтетичних музичних творів

Таблиця 1.

Архітектура системи виявлення штучної музики

Шар	Модуль	Метод	Точність (ізольована)
1. Вхідні дані	File Ingestion	Нормалізація, декодування форматів	—
2. Акустичний	BPM Drift Detector	Аналіз сітки ударних, відхилення від квантизованої сітки	~70-75%
2. Акустичний	Stereo Field Analyzer	Mid/Side декодування, кореляційна матриця каналів	~75-80%
2. Акустичний	Spectral Cut Detector	FFT, виявлення штучного зрізу >18-20 кГц	~80-85%
3. Нейромережовий	Ensemble Classifier	N паралельних CNN/LSTM + мета-класифікатор	~93-95%
4. Watermark	Watermark Scanner	Фазовий аналіз, кореляція з відомими патернами SynthID/IRCAM	~0-99%*
5. Поведінковий	Behavioral Scorer	Частота завантажень, схожість метаданих, активність акаунту	~65-70%
6. Агрегація	Fusion Layer	Зважена сума балів (P_{AI}^{final})	~96-99%

**Точність Watermark Scanner суттєво залежить від того, чи застосовувала генеративна модель водяний знак і чи була проведена спеціальна «атака» на його видалення.*

Система функціонує як послідовний конвеєр: кожен модуль обчислює значення $s_k \in [0,1]$ та передає його до Fusion Layer. Підсумкова ймовірність AI-генерації обчислюється як зважена сума:

$$P_{AI}^{final} = \sum_{k=1}^K w_k \cdot s_k, \quad \sum_{k=1}^K w_k = 1, \quad w_k \geq 0$$

де s_k – значення k-го модуля, w_k – вага визначена за результатами навчання на розміченому датасеті методом градієнтного спуску. Бінарна класифікація здійснюється за пороговим значенням θ :

$$\hat{y} = \begin{cases} 1 (AI), & P_{AI}^{final} \geq \theta \\ 0 (human), & P_{AI}^{final} < \theta \end{cases}$$

Значення $\theta = 0,7$ пропонується як базове, однак може коригуватися залежно від контексту застосування.

Запропонована система має ряд принципів обмежень. Перше – той самий «концептуальний дрейф», коли нові версії генеративних моделей змінюють свій спектральний «відбиток», через що виникає потреба в обов'язковому регулярному перенавчанні ансамблевих класифікаторів. Друге – стійкість до постобробки: агресивне перекодування, застосування аудіоефектів або зміна тональності знижує точність спектрального аналізу до 85-93%. Третє – існуюча вразливість водяних знаків до цілеспрямованих атак із використанням нейронних кодеків. Четверте – відсутність єдиного датасету для порівняльного оцінювання методів, що ускладнює об'єктивне зіставлення результатів різних досліджень.

У висновку, проведений аналіз показав, що жоден із розглянутих методів виявлення AI-музики не є самодостатнім. Слуховий аналіз досягає точності лише 65-70% і принципово недостатній для високоякісного AI-виводу. Спектральні детектори демонструють точність 85-99% на чистих файлах, однак вразливі до постобробки. Цифрові водяні знаки юридично обов'язкові відповідно до EU AI Act, але вразливі до нейрокодеків атак. Поведінкові алгоритми ефективні для виявлення масової автоматизованої активності, але не здатні ідентифікувати одиничний екземпляр «синтетичного» музичного медіа. Запропонована інтегрована система, на основі зваженого ансамблю з ранньою зупинкою, об'єднує переваги всіх чотирьох груп методів та забезпечує практично достатній рівень точності (96-99%) при масштабованому застосуванні на цифрових платформах. Реалізація системи потребує формування єдиного мультиплатформного датасету та розробки протоколу для адаптивного перенавчання.

References

1. Deezer transparency report on AI-generated music uploads. Deezer Newsroom, 2025. URL: <https://www.deezer.com/newsroom> (access date: 15.05.2026)
2. Musci.io. How to tell if music is AI generated: Detection methods that actually work. Musci.io, 2026. URL: <https://musci.io/blog/how-to-detect-ai-generated-music> (access date: 05.15.2026)
3. ASCAP. ASCAP, BMI, and SOCAN announce AI music registration policy. ASCAP, 2025. URL: <https://www.ascap.com> (access date: 05.15.2026)
4. authio. AI music detection API: Technical documentation. authio, 2025. URL: <https://authio.io/docs> (access date: 05.15.2026)
5. European Parliament and Council of the European Union. Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). Official Journal of the European Union, OJ L, 2024/1689, 12.07.2024. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj> (access date: 05.15.2026)
6. Google DeepMind. SynthID: AI content watermarking & identification. Google DeepMind, 2024. URL: <https://deepmind.google/models/synthid/> (access date: 05.15.2026)

ANALYSIS OF METHODS AND ALGORITHMS FOR DETECTING AI-GENERATED MUSIC CONTENT

The theses are devoted to a comprehensive analysis of modern methods for identifying music generated by neural networks, their systematization into functional groups, and the substantiation of an integrated multi-layer system architecture for automatic detection of AI-generated content on digital streaming platforms using machine learning methods.

Keywords: *artificial intelligence, generative music, spectral analysis, stereo field, BPM, watermarks, multi-model ensemble, detection, neural network.*

Відомості про автора / Information about the Author

Микита Колесніков, аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: nikoplay2016@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0004-1283-2776>.

Mykyta Kolesnikov, Postgraduate Student of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: nikoplay2016@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0004-1283-2776>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.15

Ілля Крикалов,
Євген Давиденко

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РОЗКЛАДОМ ЗАНЯТЬ У ВЕБЗАСТОСУНКАХ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

У роботі досліджено децентралізовану модель управління розкладом занять як альтернативу традиційному централізованому підходу в інформаційних системах закладів вищої освіти. Розглянуто теоретичні засади реалізації такої моделі на основі рольової моделі управління доступом та проаналізовано її організаційні особливості. Проведено порівняльний аналіз централізованої та децентралізованої моделей за ключовими критеріями. Розглянуто переваги та обмеження децентралізованого підходу.

Ключові слова: розклад занять, децентралізована модель, вебзастосунок, рольова модель управління доступом, RBAC, заклад вищої освіти.

Управління розкладом занять є одним із ключових організаційних процесів у закладі вищої освіти, що інтегрує множини взаємопов'язаних ресурсів: учасників освітнього процесу, навчально-методичне забезпечення та аудиторний фонд. Ефективність цього процесу визначається не лише коректністю сформованого розкладу, але й оперативністю його актуалізації та доступністю для всіх зацікавлених сторін. Зростання кількості учасників освітнього процесу та підвищення вимог до оперативності інформування актуалізують потребу у перегляді традиційних підходів до організації управління розкладом [1, 2].

Доцільність розробки спеціалізованого вебзастосунку обумовлена низкою чинників, які обмежують ефективність наявних рішень в українських закладах вищої освіти (ЗВО). Найпоширеніший підхід до публікації розкладу – розміщення статичних таблиць у форматі Excel на хмарних сховищах на кшталт Google Drive – вимагає від користувача послідовно завантажувати файл, шукати свій факультет, групу й конкретний день, що суперечить принципам зручності взаємодії з інформацією на мобільних пристроях. Окрім того, такий підхід унеможливорює оперативне інформування про зміни у розкладі.

На основі аналізу організаційної структури навчального процесу у Чорноморському національному університеті імені Петра Могили сформульовано бізнес-правила, що визначають коректну поведінку системи управління розкладом.

Правило двотижневого циклу. Навчальний тиждень у ЗВО має двотижневу періодичність, що поділяється на тиждень над ризикою (парний) та тиждень під ризикою (непарний). Кожне заняття у розкладі групи прив'язане до одного типу тижня. Це правило реалізується через атрибут «парний тиждень» (is_even) сутності «Часовий слот».

Правило ділення груп на підгрупи. Деякі академічні групи поділяються на підгрупи (А та Б), що проводять окремі заняття у різних аудиторіях паралельно. Інформація про підгрупу зберігається у проміжній таблиці «Заняття групи» (GroupLesson). Якщо група не має підгруп (поле has_subgroups = False), то значення підгрупи у проміжній таблиці залишається порожнім (NULL). Якщо група має підгрупи, то для кожного заняття вказується підгрупа, для якої воно проводиться, або значення «Загальне», якщо заняття проводиться для обох підгруп одночасно (наприклад, лекції).

Правило обмеженого набору значень. Ряд атрибутів сутностей мають обмежений набір допустимих значень, що визначається бізнес-логікою предметної області. Зокрема, поле «день тижня» сутності «Часовий слот» обмежене значеннями понеділок – п'ятниця; поле «порядковий номер пари» – значеннями від 1 до 6; поле «тип заняття» сутності «Заняття» – значеннями «лекція» або «практика»; поле «посада» сутності «Викладач» – значеннями «професор», «доцент», «старший викладач», «викладач», «аспірант»; поле «підгрупа» проміжної таблиці – значеннями «А» або «Б».

Правило розмежування прав доступу. Користувачі системи мають доступ до функцій відповідно до призначених їм ролей. Гість має доступ виключно до перегляду розкладу для груп та викладачів без можливості редагування. Староста має право редагувати розклад виключно власної групи (тобто тієї групи, у якій він зазначений як headman).

Кожен з семи менеджерів має право редагувати дані виключно у межах своєї спеціалізації (наприклад, менеджер дисциплін може редагувати дисципліни, але не може редагувати групи чи викладачів). Адміністратор має повний доступ до всіх функцій системи, у тому числі до управління користувачами та призначення ролей.

Правило фіктивного видалення викладачів. Викладачі, що завершили співпрацю із ЗВО, не видаляються з бази даних, а позначаються як неактивні через поле `is_active`. Це дозволяє зберегти історичну цілісність даних розкладу за минулі періоди, у яких ці викладачі проводили заняття.

Правило автоматичного формування розкладу викладача. У системі реалізовано автоматичне формування розкладу для викладачів на основі даних розкладу груп. Розклад викладача не зберігається окремо у базі даних, а формується динамічно за запитом шляхом вибірки усіх занять, до яких прив'язаний цей викладач, з визначенням груп та підгруп, що беруть участь у кожному з цих занять. Такий підхід забезпечує консистентність даних: будь-яка зміна у розкладі групи автоматично відображається у розкладі відповідного викладача.

Правило безпеки автентифікації. Паролі користувачів зберігаються виключно у хешованому вигляді з використанням криптографічного алгоритму bcrypt із додаванням «солі». Автентифікація реалізується через JWT-токени, що зберігаються у базі даних з полями для відкликання, що дозволяє реалізувати примусовий вихід користувача із системи у випадку компрометації токена.

Домінуючою парадигмою у наявних інформаційних системах управління розкладом є централізована модель, за якої повноваження з формування та модифікації розкладу зосереджені виключно в адміністративних підрозділах ЗВО. У межах цієї моделі будь-яка зміна у розкладі потребує проходження повного адміністративного циклу: ініціювання запиту відповідальною особою, верифікації відповідним деканатом, внесення змін до центральної інформаційної системи та поширення оновлених даних серед учасників освітнього процесу. Тривалість такого циклу може становити від кількох годин до кількох діб, що суперечить вимогам оперативності в умовах динамічного навчального процесу. Крім того централізована модель не передбачає участі безпосередніх учасників освітнього процесу у формуванні розкладу, що знижує її адаптивність до локальних змін на рівні окремих академічних груп. Збільшення кількості груп у закладі пропорційно збільшує навантаження на адміністративний персонал, що обмежує масштабованість такого підходу [3].

Децентралізована модель управління розкладом ґрунтується на принципі делегування операційних повноважень уповноваженим представникам академічних груп – старостам. У межах цієї моделі адміністративний персонал зосереджується на управлінні довідниковими даними системи та здійсненні загального контролю, тоді як оперативне формування та актуалізація розкладу конкретної групи є відповідальністю її старости. Така архітектура розподілу повноважень усуває вузьке місце централізованої моделі – адміністративний цикл – та забезпечує суттєве скорочення часу між виникненням необхідності змін у розкладі та їх відображенням у системі [4].

Реалізація децентралізованої моделі потребує надійного механізму розмежування прав доступу що унеможливило б несанкціоновану модифікацію даних. Оптимальним інструментом для цього є рольова модель управління доступом (RBAC – Role-Based Access Control), яка базується на наданні прав доступу користувачам відповідно до їхніх функціональних ролей в організації [5, 6]. Формально модель RBAC описується чотирма множинами: множиною користувачів – U , множиною ролей – R , множиною повноважень – P та множиною сесій – S . Відношення між цими множинами визначається функцією призначення ролей $UA \subseteq U \times R$ та функцією призначення повноважень $PA \subseteq R \times P$, де кожен користувач $u \in U$ може одночасно виконувати декілька ролей $r \in R$, а кожна роль визначає підмножину повноважень $p \subseteq P$ [7, 8]. Така формалізація дозволяє гнучко моделювати організаційну ієрархію ЗВО у системі управління доступом, забезпечує принцип мінімально необхідних привілеїв та унеможливило б перевищення делегованих повноважень. Ієрархічна структура ролей дозволяє природно відобразити організаційну вертикаль університету: адміністратор системи має повний доступ, профільні менеджери управляють окремими сегментами довідникових даних, а старости – виключно розкладом власної групи [9].

Порівняльний аналіз централізованої та децентралізованої моделей управління розкладом доцільно проводити за п'ятьма ключовими критеріями.

За критерієм латентності внесення змін децентралізована модель має суттєву перевагу – уповноважена особа вносить зміни безпосередньо, що скорочує час відображення змін з кількох діб до кількох хвилин.

За критерієм масштабованості децентралізована модель є більш стійкою до зростання кількості академічних груп – повноваження розподіляються між старостами груп без додаткового навантаження на центральний апарат [3, 4].

За критерієм стійкості до адміністративних збоїв децентралізована модель також переважає – за відсутності або тимчасової недоступності адміністративного персоналу розклад може оновлюватися уповноваженими здобувачами освіти без переривання процесу.

За критерієм підзвітності даних централізована модель має очевидну перевагу – відповідальність за коректність розкладу зосереджена в одному підрозділі що забезпечує однозначну підзвітність та спрощує контроль якості.

За критерієм цілісності даних та єдиного авторитетного джерела централізована модель також переважає. Децентралізована модель генерує ризики конфліктів розкладу – одночасного призначення однієї аудиторії або одного викладача двом різним заняттям в один часовий слот. Фундаментальною проблемою є відсутність єдиного авторитетного джерела даних (single source of truth), відповідальність розподіляється між множиною уповноважених осіб кожна з яких незалежно вносить зміни до розкладу. Підтримка узгодженості даних в умовах розподіленого управління є однією з ключових технічних проблем сучасних інформаційних систем [10]. Частина конфліктів може бути виявлена автоматично засобами обмежень цілісності реляційної бази даних, проте семантичні суперечності потребують додаткових механізмів валідації на рівні бізнес-логіки системи.

Окремої уваги заслуговує організаційний аспект децентралізованої моделі – можливість залучення здобувачів освіти до управління інформаційними ресурсами університету. В умовах коли ЗВО не має можливості виділити достатній обсяг адміністративного персоналу для оперативного управління розкладом здобувачі можуть виконувати функції профільних менеджерів системи [3]. Такий підхід має подвійний ефект, з одного боку він вирішує організаційну проблему браку адміністративних ресурсів, з іншого – залучає здобувачів до університетського життя, формуючи у них відчуття причетності та відповідальності за якість організації навчального процесу. Здобувач-менеджер вносячи коректні дані до системи безпосередньо впливає на якість інформації доступної іншим учасникам освітнього процесу що створює горизонтальні зв'язки відповідальності всередині студентської спільноти.

Висновки. Децентралізована модель управління розкладом занять є перспективним підходом для інформаційних систем ЗВО що поєднує оперативність управління з контрольованістю змін. Реалізація такої моделі на основі RBAC забезпечує необхідний баланс між делегуванням операційних повноважень та збереженням цілісності даних системи. Порівняльний аналіз показав що децентралізована модель переважає централізовану за критеріями латентності змін, масштабованості та стійкості до адміністративних збоїв, що обумовлює її перспективність для ЗВО з розвинутою студентською самоврядністю. Проблема відсутності єдиного авторитетного джерела даних залишається відкритим дослідницьким питанням що потребує подальшого вивчення в контексті розробки механізмів автоматичної валідації та верифікації розкладу.

References

1. Давиденко Є. О., Фаленкова М. В., Оліфіренко К. В. Онлайн-система навчального розкладу для університету в умовах змішаного навчання. Могиліанські читання – 2020 : Досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти : XXIII Всеукр. наук.-практ. конф. : тези доповідей : Комп'ютерні науки. Технічні науки, Миколаїв, 16–20 листоп. 2020 р. ЧНУ ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2020. С. 87–89.
2. Оліфіренко К. В., Давиденко Є. О. Онлайн-система розкладу для навчання в умовах карантину. Інтелектуальні інформаційні системи : Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, аспірантів і студентів : тези доп., 9–12 лютого 2021 р. ЧНУ ім. Петра Могили. Миколаїв, 2021. С. 154–157.
3. Dass A. K. et al. A Blockchain based Decentralized University System. HBRP Publication, 2024. pp. 1–12.
4. Lee M. Y. Enacting Decentralized Authority: The Practices and Limits of Moving Beyond Hierarchy. Administrative Science Quarterly, 2024. doi: 10.1177/00018392241257372.
5. Капелюшна Т. та ін. Механізм управління доступом до інформаційних ресурсів на підприємстві. Електронне фахове наукове видання «Кибербезпека: освіта, наука, техніка», 2025, 3(27), С. 205–219. doi: 10.28925/2663-4023.2025.27.743.
6. Рзаєва С. Л. та ін. Модель реалізації керування доступом на основі ролей (RBAC) у багаторівневій архітектурі сховища даних. Сучасний захист інформації, 2025, № 3(63), С. 137–149. doi: 10.31673/2409-7292.2025.031671.
7. Sandhu R., Coyne E., Feinstein H., Youman C. Role-Based Access Control Models. IEEE Computer, 1996, Vol. 29, No. 2. pp. 38–47.
8. Sandhu R., Ferraiolo D., Kuhn R. The NIST Model for Role-Based Access Control: Towards a Unified Standard. Proceedings of the 5th ACM Workshop on Role-Based Access Control, Berlin, 2000, P. 47–63. doi: 10.1145/344287.344301.
9. Kabier M. K., Yassin A. A., Abduljabbar Z. A. Towards for Designing Educational System Using Role-Based Access Control. International Journal of Intelligent Engineering and Systems, 2023, Vol. 16, No. 2. P. 50–63. doi: 10.22266/ijies2023.0430.05.

10. Chen T., Wang H. Distributed Data Consistency Algorithm in Database Based on Language Recognition. Academic Journal of Computing & Information Science, 2023, Vol. 6, No. 7, P. 160–167. doi: 10.25236/AJCIS.2023.060721.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.15

Ілля Крикалов,
Yevhen Davydenko

**DECENTRALIZED SCHEDULE MANAGEMENT MODEL IN WEB APPLICATIONS OF HIGHER
EDUCATION INSTITUTIONS**

The paper explores the decentralized schedule management model as an alternative to the traditional centralized approach in information systems of higher education institutions. The theoretical foundations of implementing such a model based on role-based access control are examined and its organizational features are analyzed. A comparative analysis of centralized and decentralized models is conducted across key criteria. The advantages and limitations of the decentralized approach are discussed, including the problem of the absence of a single source of truth, as well as the organizational potential of student engagement in managing university information resources.

Keywords: class schedule, decentralized model, web application, role-based access control, RBAC, single source of truth, higher education institution

Відомості про авторів / Information about the Authors

Ілля Крикалов, здобувач вищої освіти спеціальності інженерія програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: krykalov.illia@chmnu.edu.ua.

Ilya Krykalov, Higher Education Student Majoring in Software Engineering of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: krykalov.illia@chmnu.edu.ua.

Євген Давиденко, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: davydenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0547-3689>.

Yevhen Davydenko, Ph.D, Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: davydenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0547-3689>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.16

Інесса Кулаковська

GREEDI ТА Δ -GREEDI: ЕФЕКТИВНІСТЬ ЖАДІБНИХ АЛГОРИТМІВ ПІД ДЕЛЬТА-МАТРОЇДНИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

Тези представляють дослідження ефективності жадібних алгоритмів та оптимізацію підмножин у розподілених системах під дельта-матроїдними обмеженнями. Метою є порівняння класичного Greedy та розподіленого GREEDI, а також його модифікації Δ -GREEDI, з точки зору якості рішень, обчислювальних характеристик та масштабованості. Алгоритми реалізовано на синтетичних графах різної щільності та розмірності, використовуючи Python-бібліотеки для моделювання та паралельних обчислень.

Результати показали, що GREEDI забезпечує скорочення часу виконання при збереженні високої якості рішень, тоді як Δ -GREEDI досягає компромісу між швидкістю та точністю завдяки врахуванню дельта-матроїдних обмежень. Експерименти підтвердили масштабованість алгоритмів у середовищах реального часу та їхню практичну придатність для задач вибору ознак, сенсорних мереж, рекомендаційних систем та оптимізації кешування.

Ключові слова: дельта-матроїдні обмеження; жадібний алгоритм; GREEDI; Δ -GREEDI; оптимізація підмножин; розподілені системи; апроксимаційні алгоритми; масштабованість; сенсорні мережі; вибір ознак; кешування

У сучасних умовах великих даних та розподілених обчислень особливого значення набувають алгоритми оптимізації підмножин. Класичні матроїдні моделі часто виявляються занадто жорсткими для динамічних систем, тоді як дельта-матроїди забезпечують більшу гнучкість у моделюванні залежностей [1]. Це відкриває нові можливості для задач вибору ознак, розміщення сенсорів та оптимізації кешування.

Графовий матроїд є корисним інструментом для формалізації задачі побудови остовного дерева в неорієнтованому графі [2]. Алгоритм Крускала можна інтерпретувати як жадібний алгоритм на базисах матроїда. Такий підхід не лише підтверджує правильність алгоритму, але й дозволяє узагальнити його на інші типи комбінаторних структур. Використання теорії матроїдів у задачах оптимізації відкриває нові можливості для ефективного аналізу графових структур. Поглиблення зв'язку між теорією графів і теорією матроїдів відкриває шлях до створення більш гнучких та стійких алгоритмів для проєктування мереж, розподілу ресурсів і комбінаторної оптимізації як у статичних, так і в динамічних системах.

Дослідження [3] встановлює єдину аналітико-комбінаторну структуру, яка поєднує спектральну теорію графів та теорію Δ -матроїдів для аналізу даних з графовою структурою в машинному навчанні. Надаючи Δ -матроїдну інтерпретацію спектральних розрізів графів, робота демонструє, як вектор Фідлера та друге найменше власне значення Лапласа можуть бути послідовно відображені в Δ -матроїдні інваріанти, визначені через базиси, оцінки та головні мінори матричних представлень. Отримані результати підтверджують, що спектральні розрізи графів допускають змістовну комбінаторну інтерпретацію, що виходить за рамки класичних евристик розбиття, що дозволяє використовувати їх як теоретично обґрунтовані наближення для завдань оптимізації та кластеризації в сучасних системах машинного навчання на основі графів.

Дельта-матроїдні обмеження дозволяють підтримувати актуальні рішення у потокових та інтерактивних середовищах без повного перерахунку. Це критично для кіберфізичних систем, «розумних міст» та адаптивних мережевих інфраструктур. GREEDI та його модифікація Δ -GREEDI демонструють здатність масштабуватися у великих системах, забезпечуючи баланс між якістю рішення та швидкістю виконання. Сфери застосування подані у таблиці 1.

Таблиця 1.

Кейси застосування.

Машинне навчання та вибір ознак У задачах класифікації та прогнозування часто потрібно обрати невелику кількість найбільш інформативних змінних із великого набору. Δ-GREEDI дозволяє враховувати кореляції між ознаками (дельта-матроїдні обмеження), що зменшує ризик дублювання інформації та підвищує точність моделей.	Сенсорні мережі та «розумні міста» Оптимальне розміщення сенсорів для моніторингу довкілля чи транспортних потоків є класичною задачею субмодульної оптимізації. GREEDI забезпечує масштабованість у великих мережах, а Δ-GREEDI дозволяє враховувати обмеження на енергоспоживання та покриття, що особливо важливо для «розумних міст» та IoT-систем.
Рекомендаційні системи У системах рекомендацій потрібно вибрати підмножину контенту (фільми, товари, статті), яка для кешування так, щоб максимізувати швидкість доступу при обмеженій пам'яті. Δ-GREEDI допомагає уникати надмірної схожості між елементами, враховувати вагу та розмір об'єктів, оптимізуючи використання ресурсів.	Кешування та управління пам'яттю У хмарних системах та CDN важливо обрати об'єкти для кешування так, щоб максимізувати швидкість доступу при обмеженій пам'яті. Δ-GREEDI дозволяє враховувати вагу та розмір об'єктів, оптимізуючи використання ресурсів.
Енергетика та телекомунікації У розподільчих енергомережах алгоритми жадібної оптимізації застосовуються для балансування навантаження. Δ-GREEDI може бути використаний для адаптивного керування фазами у низьковольтних мережах, а також для оптимізації трафіку у телекомунікаційних системах.	Обробка поточкових даних та реального часу У задачах відеобробки, криптографії чи комп'ютерного зору GREEDI та Δ-GREEDI дозволяють розподіляти обчислення між ядрами процесора або вузлами кластера, забезпечуючи високу швидкість та стійкість до збоїв.

GREEDI — це двофазний розподілений жадібний алгоритм, який поєднує локальні обчислення на вузлах із глобальною агрегацією результатів. Подальші роботи розширили його застосування у поточкових середовищах та під додатковими обмеженнями. Дельта-матроїди стали природним продовженням класичних матроїдних структур, дозволяючи враховувати вагу та розмір елементів і забезпечуючи більш гнучкі правила обміну.

У дослідженні [1] реалізовано три алгоритми: класичний Greedy, GREEDI та Δ -GREEDI. Всі вони були протестовані на синтетичних графах різної щільності та розмірності (100–10000 вузлів). Для моделювання використано Python-бібліотеки NetworkX, NumPy та multiprocessing. Δ -GREEDI додатково перевіряє допустимість вибору відповідно до дельта-матроїдних обмежень, що підвищує якість рішень у розподілених системах.

Класичний Greedy забезпечує високу якість рішень, але погано масштабується. GREEDI значно швидший завдяки паралельності, проте якість рішень дещо нижча. Δ -GREEDI досягає компромісу: якість близька до централізованого Greedy, а швидкість — до GREEDI, хоча додаткові перевірки збільшують комунікаційні витрати.

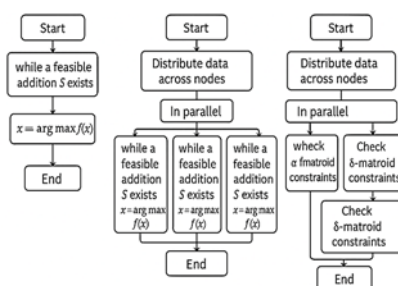


Рис. 1. Порівняльна блок-схема жадібних алгоритмів: централізований жадібний, GREEDI та Δ -GREEDI [1]

У симуляціях на ≥ 500 вузлах GREEDI показав на 15–30% кращу продуктивність порівняно з класичним Greedy. Δ -GREEDI підтвердив ефективність у складних топологіях із нелінійними обмеженнями [1].

Таблиця 2.

Порівняння алгоритмів GREEDI/ Δ -GREEDI

Сфера застосування	Приклад задачі	Переваги GREEDI/ Δ -GREEDI
Машинне навчання	Вибір ознак для класифікації чи прогнозування	Δ -GREEDI враховує кореляції між ознаками, зменшує дублювання, підвищує точність моделей
Сенсорні мережі / Smart City	Оптимальне розміщення сенсорів для моніторингу	GREEDI масштабується на великі мережі; Δ -GREEDI враховує енергоспоживання та покриття
Рекомендаційні системи	Формування списку контенту для користувача	Δ -GREEDI забезпечує різноманітність рекомендацій, уникає надмірної схожості
Кешування та пам'ять	Вибір об'єктів для кешування у CDN чи хмарі	Δ -GREEDI оптимізує використання ресурсів, враховуючи вагу та розмір об'єктів
Енергетика та телекомунікації	Балансування навантаження у мережах, оптимізація трафіку	Δ -GREEDI адаптивно керує ресурсами, зменшує втрати та покращує ефективність
Потокові дані / реальний час	Обробка відео, криптографія, комп'ютерний зір	GREEDI забезпечує швидкість та стійкість до збоїв; Δ -GREEDI додає контроль залежностей

Проведені симуляції на синтетичних графах підтвердили працездатність GREEDI та його модифікації Δ -GREEDI у середовищах із дельта-матроїдними обмеженнями. Алгоритми показали стабільність при збільшенні кількості вузлів та здатність ефективно працювати у розподілених системах. Це доводить, що GREEDI може бути адаптований до складних структурних залежностей і залишатися придатним для практичного використання у реальному часі.

Дельта-матроїдні обмеження підвищили якість рішень, наближаючи їх до результатів централізованого Greedy, але водночас збільшили комунікаційні витрати між вузлами. Кількісний аналіз показав, що Δ -GREEDI забезпечує кращий баланс між точністю та швидкістю, особливо у великих графах із високою щільністю зв'язків. Це дозволяє обґрунтовано застосовувати алгоритм у задачах, де важлива не лише швидкість, а й якість апроксимації.

Розроблений підхід базується на двофазній стратегії: локальна обробка даних на вузлах та глобальна координація результатів із врахуванням дельта-матроїдних обмежень. Така архітектура довела свою здатність масштабуватися на великі обсяги даних, забезпечуючи реальну продуктивність у поточкових середовищах. Це відкриває перспективи використання алгоритму у хмарних платформах, MapReduce-подібних системах та багатоядерних процесорах.

Результати дослідження підтверджують, що GREEDI та Δ -GREEDI мають широкий спектр застосувань. У сенсорних мережах вони оптимізують розміщення датчиків; у рекомендаційних системах — забезпечують різноманітність контенту; у машинному навчанні — підвищують ефективність вибору ознак; у кешуванні — оптимізують використання пам'яті. Таким чином, алгоритми стають універсальним інструментом для сучасних розподілених систем, де потрібна швидка та якісна оптимізація підмножин.

References

1. Kulakovska, I. (2025). Efficiency analysis of GREEDI algorithm under delta-matroid constraints for subset selection in distributed systems. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2025(4), 69–82. <https://doi.org/10.32620/reks.2025.4.05> <https://nti.khai.edu/ojs/index.php/reks/article/view/reks.2025.4.05>
2. Kulakovska, I. V. (2025). Graph matroid and analysis of sleeping trees in a graph [Графовий матроїд та аналіз спануючих дерев у графі]. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, (40, Part 2). <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-40-02-036>
3. Kulakovska, I. V. (2026). A δ -matroid interpretation of spectral graph cuts in graph-structured machine learning data. *Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal*, 41, 291–307. DOI: [10.47451/esej-tec-69](https://doi.org/10.47451/esej-tec-69)

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.16

Inessa Kulakovska

EFFICIENCY OF GREEDI AND Δ -GREEDI ALGORITHMS UNDER DELTA-MATROID CONSTRAINTS IN DISTRIBUTED SYSTEMS

This paper investigates the efficiency of greedy subset optimization algorithms in distributed systems under delta-matroid constraints. The aim is to compare the classical Greedy algorithm with the distributed GREEDI and its modification Δ -GREEDI in terms of solution quality, computational performance, and scalability. The algorithms were implemented on synthetic graphs of varying density and size using Python libraries for modeling and parallel computation. Results demonstrate that GREEDI significantly reduces execution time while maintaining high-quality solutions, whereas Δ -GREEDI achieves a balance between speed and accuracy by incorporating delta-matroid feasibility checks. Experimental evaluation confirmed scalability in real-time environments and highlighted practical relevance for feature selection, sensor networks, recommendation systems, and cache optimization.

Keywords: delta-matroid constraints; greedy algorithm; GREEDI; Δ -GREEDI; subset optimization; distributed systems; approximation algorithms; scalability; sensor networks; feature selection; caching

Відомості про автора / Information about the Author

Інесса Кулаковська, канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна. e-mail: inessa.kulakovska@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8432-1850.

Inessa Kulakovska, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of Department of Intelligent Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: inessa.kulakovska@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8432-1850.

© І. Кулаковська

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.17

Олександр Мещанінов

Е-УНІВЕРСИТЕТ ЯК СОЦІАЛЬНА МЕРЕЖА

Тези представляють теоретико-методологічний аналіз цифровізації як вирішального чинника розвитку цифрового суспільства та розвитку університетської системи освіти в Україні. Представлено генезис форм організації університетів. Від класичної до концептуальної, як природної форми трансформації класичної, у прийдешньому інформаційному світі. Еволюція моделі університетської системи освіти відбувається з опертям на концептуальні Рамки, що задекларовані, як Великою Хартією Університетів (Болонья, Італія) 1988 та 2020 років, так і Хартією Університетів України (Ялта, Україна) 2009 року разом із Ольвійською Декларацією Університетів: Академічні свободи, університетська автономія, наука і освіта для сталого розвитку та Рамками пріоритетних дій: Втілення в життя Ольвійської Декларації Університетів.

Ключові слова: електронний університет, Е-університет, соціальна мережа, педагогіка вищої школи, світоглядна картина світу, автоматизоване ВЕБ середовище, Велика Хартія Університетів, Хартія Університетів України, образ бажаного майбуття.

Кожна магістерська програма України включає дисципліну «Педагогіка вищої школи», як нормативну. Цім передбачається передача магістрантам переконань важливості світоглядної «картини світу» та її змісту. Тобто, назву дисципліни «Педагогіка вищої школи» можливо замінити на назву «Світоглядна картина світу». Таке ставлення накладає серйозну відповідальність на викладачів означеної дисципліни. А з урахуванням принципу випереджаючого характеру вищої освіти викладачі повинні відповідати властивостям письменника фантаста, оскільки на них покладена відповідальність по опису майбуття університетів з тими властивостями яки ще не існують. Тобто викладачі мусять навчати, передавати власні переконання про майбуття університету і як логічний крок – майбуття світу. Світу, який повинні створювати випускники тобто майбутні магістри, тобто, майбутня серцевина суспільства світу, що так чи і наче прийде, замінить існуючу форму, стан. Але світ над те складний, щоб його образ, модель, визначався одним викладачем, навіть і талановитим. Визначення майбуття світу повинно бути обов'язком кожного, хто має власне бачення та здібності по його втіленню, зміни оточуючого середовища. Отже постає питання про створення та застосування інструменту по колегіальному формуванню образу бажаного майбуття та його динамічного оновлення, розвитку, з урахуванням динамічних змін оточення. Окреслене нагадує нам що треба надавати магістрантам «вудку, а не рибу». Постає питання, що такою «вудкою» повинно бути автоматизоване ВЕБ середовище, спеціалізоване програмне забезпечення, як вказаний інструмент.

Саме тому, дисципліна «Педагогіка вищої школи» це сучасний інструментарій із сучасною метрикою, як автоматизоване ВЕБ середовище, що розраховано на колегіальне визначення образу бажаного майбуття.

Для досягнення окреслених цілей у Чорноморському національному університеті імені Петра Могили і були розроблені та створені відповідна дисципліна «Педагогіка вищої школи» (2016 рік) та автоматизоване ВЕБ середовище [1] (2005 рік) на базі системи управління навчанням MOODLE. Отже, Чорноморський національний університет імені Петра Могили є своєрідним взірцем сучасного електронного університету, або е-університету, побудованого із опертям на втілення класичних організаційних форм та ІТ ресурсів.

Спираючись на принцип єдності навчання та наукових досліджень у дисципліні «Педагогіка вищої школи» передбачене науковий аналіз магістрантами наступних наукових публікацій [2-10], які об'єднані у відповідні розділи, або глави, з публікацією у майбутньому у відповідному науковому виданні.

Глава 1. Основи теорії оновлення університетів України

1.1 Обґрунтування гіпотези про можливість колегіального формування «всем миром» образу бажаного майбуття.

1.1 Аксіоматичні основи та технологія дослідження систем з визначенням категоріальних пар протилежностей та матриці векторів.

- 1.1 Організація діагностики та оцінювання складних систем для концептуального проектування змін.
- 1.1 Колегіальне формування образу бажаного майбуття.

Глава 2. Практики розширення університетської системи освіти

- 2.1 Ідея Університету сьогодення, хто винен та що робити?
- 2.1 Університетське середовище як визначальний фактор еволюції університетів України.
- 2.1 Ефективність та продуктивність чи стабільність та надійність як пріоритети сталого розвитку університетів України.
- 2.1 Міфи та реалії єдності навчання та досліджень в університетах України.
- 2.1 Університет як інтелектуальний концентратор ідей та конкурентних пар протилежностей, для намацування шляху по переходу до сталого розвитку життя.
- 2.1 Еволюція моделі університетської системи освіти.

Глава 3. Майбуття розвитку університетів України

- 3.1. Концептуальний Університет - концептуальні сила та концентратор по переходу на шлях до сталого розвитку життя.
- 3.2. Велика Хартія Університетів 1988.
- 3.3. Велика Хартія Університетів 2020.
- 3.4. Хартія Університетів України 2009.
- 3.5. Ольвійська Декларація Університетів: Академічні свободи, університетська автономія, наука і освіта для сталого розвитку.
- 3.6. Рамки пріоритетних дій: Втілення в життя Ольвійської Декларації Університетів.
- 3.7. Статут всеукраїнської громадської освітньо-наукової організації «Асоціація Університетів України».

Рекомендовані наукові видання характеризують ІТ інструментарій для колегіальної діагностики, оцінки та планування інтелектуального розвитку університетської системи освіти. В основу розробки покладена теорія дослідження організаційної культури, що запропонована американськими вченими Камероном Ким С. та Куїном Роберт Е. [1], як своєрідна рамкова конструкція. Наповнення рамкової конструкції базується на наукових розробках автора, що включають технологію дослідження систем з визначенням категоріальних пар протилежностей та матриці векторів. Розроблене програмне забезпечення для організації розвитку університету наочно показує магістрантам можливості ІТ інструментарію для розв'язання значимих наукових та практичних завдань. Отже, зміст їх спеціальності наочно проілюстровано застосуванням у зрозумілій для них сфері. Сфері вищої освіти.

Науковий аналіз магістрантами наукових публікацій, за наведеними назвами, довів здатність та зацікавленість магістрантів у дослідженні запропонованого матеріалу. Показовим є протокольна активність роботи магістрантів що відповідала їх активності у залученості та застосуванні соціальних мереж.

References

1. Автоматизована веб-система підтримки планування розвитку університету [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://moodle.chdu.edu.ua/course/view.php?id=745>
2. Мещанінов О.П. Генезис свідомості: від зростання через розвиток до досягнення. Наукове видання. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, Ольвійській форум - 2023. – 2 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://moodle3.chmnu.edu.ua/mod/assign/view.php?id=718640>
3. Мещанінов О.П. Організація діагностики та оцінювання складних систем для концептуального проектування змін. Тези XVI Міжнародної наукової конференції «Ольвійський форум-2022: Стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі», 24.06.2022. – 2 с. <https://moodle3.chmnu.edu.ua/mod/assign/view.php?id=542808>
4. Мещанінов О.П. Колегіальне формування образу бажаного майбуття. Тези XVI Міжнародної наукової конференції «Ольвійський форум-2022: Стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі», 24.06.2022. – 2 с. <https://moodle3.chmnu.edu.ua/mod/assign/view.php?id=542812>
5. Мещанінов О.П. Університет як інтелектуальний концентратор ідей та конкурентних пар протилежностей, для намацування шляху по переходу до сталого розвитку життя. Тези Всеукраїнської щорічної науково-практичної конференції «Могилянські читання – 2022: Досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти», 10 листопада 2022. – 2 с. <https://moodle3.chmnu.edu.ua/mod/assign/view.php?id=542814>

6. Мещанинов О.П. Концептуальний Університет - концептуальні сила та концентратор по переходу на шлях до сталого розвитку життя. Відкрита лекція доктор педагогічних наук, професор Мещанінова Олександра Павловича з дисципліни "Педагогіка вищої школи", 21 травня 2022 р. – 5 с. https://moodle3.chmnu.edu.ua/pluginfile.php/665724/mod_resource/content/6/%D0 або <https://www.youtube.com/watch?v=wincYHrGVbs>
7. Мещанинов О.П. Обґрунтування гіпотези про можливість колегіального формування «всем миром» образу бажаного майбуття. <https://moodle3.chmnu.edu.ua/mod/assign/view.php?id=542772>
8. Мещанинов О.П. Аксиоматичні основи та технологія дослідження систем з визначенням категоріальних пар протилежностей та матриці векторів. <https://moodle3.chmnu.edu.ua/mod/assign/view.php?id=542774>
9. Мещанинов О.П. Ідея Університету сьогодення, хто винен та що робити? <https://moodle3.chmnu.edu.ua/mod/assign/view.php?id=542776>
10. Мещанинов О.П. Єдність дистанційних форм навчання і наукових досліджень: розширення можливостей сучасної університетської системи освіти // Наукові праці: Науково-методичний журнал. – Т. 270. Вип. 258. Педагогічні науки. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. – 2016. – С. 7–11. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lib.chmnu.edu.ua/pdf/naukpraci/pedagogika/2016/270-258-1.pdf>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.17

Oleksandr Meshchaninov

E-UNIVERSITY AS A SOCIAL NETWORK

The theses present a theoretical and methodological analysis of digitalization as a decisive factor in the development of a digital society and the development of the university education system in Ukraine. The genesis of university organization forms is presented. The genesis of university organization forms is presented. From classical to conceptual, as a natural form of transformation of classical, in the coming information world. The evolution of the model of the university education system is based on the conceptual Frameworks declared by both the Magna Carta of Universities (Bologna, Italy) of 1988 and 2020, and the Charter of Universities of Ukraine (Yalta, Ukraine) of 2009, together with the Olbia Declaration of Universities: Academic Freedoms, University Autonomy, Science and Education for Sustainable Development and the Framework of Priority Actions: Implementing the Olbia Declaration of Universities.

Keywords: *electronic university, E-university, social network, higher education pedagogy, worldview, automated WEB environment, Magna Carta of Universities, Charter of Universities of Ukraine, image of the desired future.*

Відомості про автора / Information about the Author

Олександр Мещанінов, д. пед. наук, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: map1950@i.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1634-3740>.

Oleksandr Meshchaninov, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Department of Intellectual Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: map1950@i.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1634-3740>.

© О. Мешанінов

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.18

Леонід Пелихівський,
Андрій Бень,
Сергій Вороненко

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕННЯ АВТОНОМНИХ НАДВОДНИХ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Тези присвячені розробленню концептуального підходу до оцінювання ризику зіткнення автономних надводних суден з урахуванням невизначеності навколишнього середовища. Розглянуто актуальність створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для Maritime Autonomous Surface Ships, здатних функціонувати в умовах складного та динамічного навігаційного середовища. Наголошується, що традиційні методи оцінювання ризику, засновані переважно на показниках DCPA та TCPA, не повною мірою враховують вплив вітру, течій, хвилювання, якості навігаційних даних та інших факторів невизначеності.

У роботі запропоновано нечітку модель оцінювання ризику зіткнення, яка інтегрує геометричні параметри зближення суден, фактори навколишнього середовища та індекс невизначеності. Особливу увагу приділено структурному розділенню ризику на геометричну та контекстну складові, а також використанню двошарової системи нечіткого висновку. Врахування відповідальності суден відповідно до міжнародних правил COLREGs забезпечує узгодженість запропонованого підходу з морською практикою та нормативними вимогами. Зазначено, що результати дослідження можуть бути використані як основа для подальшого розвитку інтелектуальних навігаційних систем та систем підтримки прийняття рішень в автономному судноводінні.

Ключові слова: автономні надводні судна, Maritime Autonomous Surface Ships, MASS, ризик зіткнення, нечітка логіка, DCPA, TCPA, COLREGs, навколишнє середовище, невизначеність, інтелектуальні навігаційні системи, підтримка прийняття рішень.

Розвиток автономних надводних суден (Maritime Autonomous Surface Ships, MASS) зумовлює необхідність створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, здатних функціонувати в умовах складного навігаційного середовища. Одним із ключових елементів процесу створення таких систем є розробка математичних моделей для оцінювання ризику зіткнень суден, що необхідно для подальшого формування безпечних стратегій розходження відповідно до міжнародних правил COLREGs [1, 2].

У сучасних дослідженнях ризик зіткнення розглядається як багатофакторна динамічна величина, що залежить не лише від геометрії зближення суден, а й від контекстних факторів, зокрема стану навколишнього середовища та якості навігаційних даних [1]. Традиційні підходи, засновані на показниках найкоротшого часу та дистанції зближення (DCPA та TCPA), ефективно описують геометричні аспекти руху та взаємодії суден, однак не враховують повною мірою вплив зовнішніх факторів і невизначеності [2].

Аналіз існуючих методів показує, що сучасні підходи до оцінювання ризику можна умовно поділити на кілька груп. Першу групу становлять класичні моделі, що базуються на геометричних параметрах зближення суден. Другу представляють методи, які враховують динаміку руху та обмеження маневрування (velocity obstacles). У третю групу входять нечіткі та гібридні моделі, які дозволяють інтегрувати різномірні фактори ризику та враховувати невизначеність оцінки навігаційних параметрів [4, 8].

Також слід зазначити, що особлива увага дослідників приділяється врахуванню впливу навколишнього середовища. Дані, отримані від автоматичної ідентифікаційної системи (AIS) у поєднанні з метеорологічною інформацією, дозволяють врахувати вплив вітру, течій та хвилювання, які можуть суттєво змінювати поведінку суден і впливати на достовірність прогнозування їх траєкторій [3]. Вищевказане обумовлює необхідність інтеграції факторів впливу зовнішнього середовища у моделі оцінювання ризику.

Пропонується застосування комплексного підходу до побудови нечіткої моделі оцінювання ризику зіткнення автономних суден, яка поєднує геометричні параметри зближення, фактори впливу навколишнього середовища та невизначеності. Ключовою особливістю моделі є структурне розділення ризику на геометричну та контекстну складові, що дозволяє більш адекватно відображати реальні умови експлуатації автономних суден.

Моделі реалізується у вигляді двошарової системи нечіткого логічного висновку. На першому рівні формується оцінка геометричного ризику на основі параметрів взаємного руху суден. На другому рівні враховується вплив навколишнього середовища та ступінь невизначеності даних. Такий підхід дозволяє узгоджено інтегрувати різні джерела інформації та підвищити достовірність оцінювання ризику.

Додатковою особливістю запропонованої моделі є врахування відповідальності суден відповідно до Міжнародних правил запобігання зіткнень суден (COLREGs). Вказане забезпечує узгодженість результатів оцінювання ризику з морською практикою та нормативними вимогами [5].

Для налаштування вагових коефіцієнтів у моделі доцільно використовувати методи багатокритеріального аналізу, зокрема метод аналізу ієрархій, що дозволяє адаптувати модель до різних типів суден і умов експлуатації [9]. Перспективним є також використання нечітких систем інтервального типу та теорії доказів для більш глибокого врахування невизначеності [10].

Запропонований підхід дозволяє підвищити надійність оцінювання ризику зіткнення в умовах неповної і неточної інформації, що є критично важливим для автономного судноводіння.

Висновки

Розглянуто сучасні підходи до оцінювання ризику зіткнення автономних надводних суден та визначено їх основні обмеження. Запропоновано нечітку модель оцінювання ступеню ризику зіткнення автономних суден, яка поєднує в собі геометричні параметри зближення, фактори навколишнього середовища та індекс невизначеності.

Особливістю моделі є розділення геометричного та контекстного ризику, використання двошарової нечіткої системи та врахування COLREGs-відповідальності. Вказане дозволяє підвищити достовірність оцінювання ризику та забезпечити узгодженість із морською практикою.

Отримані результати можуть бути використані у процесі розробки систем підтримки прийняття рішень в автономному судноводінні та у вирішенні задач, пов'язаних з розвитком та удосконаленням інтелектуальних навігаційних систем.

References

1. Zhang, X., et al. Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*. 2021;235:109380. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109380>.
2. Burmeister, H.-C., Constapel, M. Autonomous Collision Avoidance at Sea: A Survey. *Frontiers in Robotics and AI*. 2021;8:739013. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.739013>.
3. Zhou, Y., Daamen, W., Vellinga, T., Hoogendoorn, S. P. Impacts of wind and current on ship behavior in ports and waterways: A quantitative analysis based on AIS data. *Ocean Engineering*. 2020;213:107774. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107774>.
4. Shi, Z., Zhen, R., Liu, J. Fuzzy logic-based modeling method for regional multi-ship collision risk assessment considering impacts of ship crossing angle and navigational environment. *Ocean Engineering*. 2022;111847. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111847>.
5. Ahmed, Y. A., et al. COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(8):790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>.
6. Cheng, K., et al. A novel fuzzy comprehensive evaluation method for ship collision risk. *Ocean Engineering*. 2025;332:121462. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121462>.
7. Korupoju, A. K., Kapadia, V., Vilwathilakam, A. S., Samanta, A. Ship Collision Risk Evaluation using AIS and weather data through fuzzy logic and deep learning. *Ocean Engineering*. 2025;318:120116. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120116>.
8. Zhao, L., Fu, X. A novel index for real-time ship collision risk assessment based on velocity obstacle considering dimension data from AIS. *Ocean Engineering*. 2021;240:109913. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109913>.
9. Yu, Q., Teixeira, A. P., Liu, K., Guedes Soares, C. Framework and application of multi-criteria ship collision risk assessment. *Ocean Engineering*. 2022;250:111006. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111006>.
10. Park, J. Estimation of Vessel Collision Risk Under Uncertainty Using Interval Type-2 Fuzzy Inference Systems and Dempster-Shafer Evidence Theory. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026;14(1):34. <https://doi.org/10.3390/jmse14010034>.

**MODEL FOR ASSESSING THE COLLISION RISK OF MARITIME AUTONOMOUS SURFACE SHIPS
TAKING INTO ACCOUNT ENVIRONMENTAL INFLUENCE FACTORS**

The theses are devoted to the development of a conceptual approach to assessing the collision risk of maritime autonomous surface ships, taking into account environmental uncertainty. The relevance of creating intelligent decision support systems for Maritime Autonomous Surface Ships capable of functioning in a complex and dynamic navigational environment is considered. It is emphasized that traditional risk assessment methods, based mainly on DCPA and TCPA indicators, do not fully take into account the influence of wind, currents, waves, the quality of navigational data, and other uncertainty factors.

The paper proposes a fuzzy model for collision risk assessment that integrates the geometric parameters of vessel encounters, environmental factors, and an uncertainty index. Particular attention is paid to the structural separation of risk into geometric and contextual components, as well as to the use of a two-layer fuzzy inference system. Taking into account the responsibility of vessels in accordance with the International Regulations for Preventing Collisions at Sea — COLREGs — ensures the consistency of the proposed approach with maritime practice and regulatory requirements. It is noted that the results of the study can be used as a basis for the further development of intelligent navigation systems and decision support systems in autonomous navigation.

Keywords: maritime autonomous surface ships, Maritime Autonomous Surface Ships, MASS, collision risk, fuzzy logic, DCPA, TCPA, COLREGs, environment, uncertainty, intelligent navigation systems, decision support.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Леонід Пелихівський, аспірант Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: leonid.pelykhivskiy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1226-3091>.

Leonid Pelykhivskiy, PhD Student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: leonid.pelykhivskiy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1226-3091>.

Андрій Бень доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9029-3489>.

Andrii Ben, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work of Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9029-3489>.

Сергій Вороненко, кандидат технічних наук, доцент кафедри Експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: voronenko447@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9606-6538>.

Serhii Voronenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Operation of Ship Electrical Equipment and Automation, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: voronenko447@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9606-6538>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.19

Віктор Раленко,
Євгеній Стоєв

ВИКОРИСТАННЯ МІКРОФРОНТЕНДНОЇ АРХІТЕКТУРИ ПРИ СТВОРЕННІ МАСШТАБОВАНИХ КОРИСТУВАЦЬКИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

У тезах досліджується застосування мікрофронтендної архітектури для створення масштабованих користувацьких інтерфейсів на базі екосистеми React. Проаналізовано принципи декомпозиції монолітних вебдодатків на незалежні мікрофронтенди з чітко обмеженою зоною відповідальності. Обґрунтовано, що такий підхід суттєво оптимізує паралельну розробку та розгортання застосунків.

Окрема увага приділяється методам надійної інкапсуляції логіки та стилів: продемонстровано, як підтримка технологій CSS-модулізації дозволяє уникнути конфліктів візуального відображення між незалежними компонентами під час їхньої інтеграції.

Ключові слова: мікрофронтенд, React, CSS-модулізація, масштабованість інтерфейсів, frontend розробка.

Стрімкий розвиток вебтехнологій призвів до ускладнення структури користувацьких інтерфейсів, завдяки чому постала проблема оновлення вебзастосунків для оптимізації розробки, оскільки традиційно використовувалась завжди монолітна архітектура, де весь код для фронтенду об'єднаний у єдину кодову базу, яка компілюється, тестується і розгортається як єдиний застосунок. Попри початкову простоту розробки, через деякий час зростання об'єму коду і кількості компонентів проєкту монолітний підхід надає проблеми під час додаткового масштабування, такі як жорстка зв'язність складових системи. В застосунках, які розроблені за допомогою монолітної архітектури, будь яка зміна елемента користувацького інтерфейсу, така як наприклад оновлення логіки анімації кнопки або модифікація базових стилів, приводить до повної перезбірки всього проєкту.

Окрім цього, одночасна робота декількох розробників або команд через монолітну архітектуру ускладнюється, оскільки збільшується частка конфліктного коду, які потрібно вирішувати. Ця проблема вирішується переходом до парадигми мікрофронтендів. Парадигма дозволяє декомпонувати великий монолітний інтерфейс на ізольовані, слабо зв'язані UI-компоненти або мікрододатки, завдяки чому забезпечується їхня цілкова автономність, що означає що оновлення, тестування та розгортання окремого компонента відбувається незалежно, без ризику порушити стабільність та працездатність усієї системи.[1]

Вибір інструментарію для реалізації мікрофронтендної архітектури базується на необхідності забезпечити баланс між ізольованістю компонентів та продуктивністю системи. Еволюція підходів до розподілу користувацьких інтерфейсів пройшла кілька етапів, від жорсткої ізоляції до динамічної інтеграції модулів.

Історично першим методом розв'язання задачі інтеграції незалежних частин інтерфейсу було використання елементів `iframe`, завдяки чому гарантувалась абсолютна ізоляція середовища виконання та стилів, що унеможливило конфлікти. Проте у сучасному вебі використання `iframe` для побудови масштабованих додатків вважається застарілим, оскільки під час використання додаються значні накладні витрати оперативної пам'яті через завантаження власного оточення кожним компонентом, ускладнюється маршрутизація, додаються проблеми з SEO-оптимізацією та вкрай обмежені можливості обміну даними між батьківським і дочірнім вікнами.

Альтернативним, більш сучасним стандартом є Web Components, який дозволяє створювати фреймворк-агностичні компоненти з надійно інкапсульованою логікою та стилями на рівні браузера. Однак при створенні складних UI-бібліотек на базі декларативних фреймворків використання Web Components часто призводить до необхідності створення додаткових шарів сумісності і ускладнює управління комплексними структурами даних.

На сьогодні стандартом де-факто та найбільш ефективним архітектурним патерном для мікрофронтендів є технологія Module Federation.[2] Вона спочатку була представлена як функціонал збирача Webpack, а зараз вона активно імплементується у високошвидкісних інструментах нового покоління, таких як Vite, які працюють у середовищі Node.js. Завдяки використанню технології Module Federation кардинально змінюється парадигма

інтеграції компонентів, оскільки замість статичного зв'язування компонентів на етапі збірки, відбувається динамічне завантаження відкомпільованого JavaScript-коду під час виконання програми. На практиці це означає, що головний додаток може імпортувати віддалені UI-компоненти такі як набори анімованих кнопок або складні інтерактивні форми безпосередньо з інших серверів так, ніби вони є локальними модулями. Використання сучасного стека на базі React та Vite забезпечує розробникам високу швидкість гарячого перезавантаження та можливість спільного використання залежностей, завдяки чому запобігається дублювання базових бібліотек у пам'яті клієнта, гарантуючи високу продуктивність та плавність роботи розподіленого інтерфейсу.

Одним із найскладніших викликів під час інтеграції мікрофронтендів є забезпечення надійної ізоляції каскадних таблиць стилів. У традиційному веб-і CSS має глобальну область видимості. Коли незалежні UI-компоненти завантажуються в єдиний хост-контейнер, виникає високий ризик конфлікту простору імен коли базові класи одного модуля непередбачувано перевизначають візуальне відображення елементів іншого, розробленого іншою командою.

Для усунення ризиків візуальної регресії в архітектурі розподілених користувацьких інтерфейсів застосовуються три основні підходи інкапсуляції:

1. Shadow DOM: Надає сувору інкапсуляцію на рівні рушія браузера. Стили, визначені всередині тінювого дерева, фізично не здатні вийти за його межі та вплинути на глобальний документ. Попри те, що це найнадійніший нативний метод, його використання у зв'язі з декларативними бібліотеками які покладаються на Virtual DOM, часто ускладнює делегування подій та передачу контексту.

2. CSS-in-JS: Парадигма, за якої стилі описуються в синтаксисі JavaScript і динамічно генеруються під час виконання програми, через що гарантується повна унікальність класів компонентів, проте створюється додаткове обчислювальне навантаження на клієнтський пристрій під час парсингу та виконання JS-коду.

3. CSS Modules: Гібридний та найбільш збалансований підхід для інфраструктури на базі сучасних інструментів збірки, таких як Vite. Під час компіляції імена локальних класів автоматично трансформуються у глобально унікальні хешовані рядки.

Метод модулів CSS демонструє найвищу ефективність при створенні кастомних бібліотек інтерактивних елементів таких як наборів складноанімованих кнопок, тумблерів чи індикаторів кроків, де поведінка реалізується переважно за допомогою чистих CSS-анімацій. Ізоляція за допомогою хешування класів дозволяє зберегти максимальну продуктивність рендерингу завдяки тому що браузер працює з нативним CSS, а не JS-обгортками, і при цьому надійно інкапсулює складну математику трансформацій та ключових кадрів строго всередині окремого мікрокомпонента, завдяки чому унеможливорюється "поломка" дизайну при масштабуванні системи чи додаванні нових модулів.

Фундаментальний парадокс мікрофронтендної архітектури полягає у необхідності балансувати між суворою ізоляцією модулів та вимогами бізнес-логіки щодо їхньої інтеграції. Хоча UI-компоненти розробляються і розгортаються незалежно, у реальному середовищі виконання вони повинні обмінюватися даними. Класичним прикладом обміну даними є система електронної комерції, де компонент "Кнопка додавання товару" повинен передати дані до компонента "Кошик", при цьому не маючи прямих посилань на його кодову базу.

Для забезпечення ефективної взаємодії без створення жорстких залежностей у сучасній розробці застосовуються два основні архітектурні патерни: подійно-орієнтована модель та спільний розподілений стан. Найбільш децентралізованим та фреймворк-агностичним методом є використання нативних браузерних подій, зокрема API CustomEvent. У цій парадигмі мікрофронтенди взаємодіють за патерном "Видавець-Підписник", яка передбачає те що компонент-ініціатор генерує кастомну подію з необхідним корисним навантаженням на рівні глобального об'єкта window, а інші компоненти прослуховують її через addEventListener, завдяки чому підхід гарантує повну незалежність модулів: компонент каталогу просто "повідомляє" браузер про вибір товару, не знаючи, чи існує на сторінці віджет кошика взагалі.

У випадках, коли додаток потребує складної синхронізації даних реального часу, подійно-орієнтованої моделі стає недостатньо. Використання традиційних монолітних сховищ суперечить філософії мікрофронтендів, оскільки створює єдину точку відмови та змушує команди узгоджувати структуру даних.

Оптимальним рішенням для розподілених інтерфейсів є використання реактивних потоків даних або легковажних атомарних стейт-менеджерів. За допомогою технології Module Federation, хост-додаток створює єдиний екземпляр сховища стану або React Context і динамічно ділиться ним як спільною залежністю з усіма підвантаженими мікро-компонентами, завдяки чому ізольовані модулі можуть читати та мутувати глобальний стан, зберігаючи при цьому автономність власних циклів збірки та релізу.

Впровадження мікрофронтендної архітектури має дуалістичний вплив на загальну продуктивність вебдодатка. З одного боку, декомпозиція моноліту дозволяє суттєво оптимізувати процес доставки контенту. Завдяки механізмам відкладеного коду, клієнтський пристрій отримує лише той код, який необхідний для рендерингу поточного стану інтерфейсу. Прикладом декомпозиції моноліту вважається ситуація коли логіка складного віджета аналітики завантажується лише в момент взаємодії з ним, що радикально зменшує розмір

початкового пакета даних і позитивно впливає на ключові вебметрики, такі як Time to Interactive та First Contentful Paint. При цьому з іншого боку, перехід від статичної збірки до динамічної інтеграції компонентів під час виконання генерує нові класифікації мережових витрат, через що замість одного монолітного файлу браузер змушений ініціювати множинні асинхронні HTTP-запити для отримання ізольованих чанків мікрофронтендів. Без належного архітектурного контролю це призводить до проблеми дублювання залежностей, коли незалежні модулі завантажують власні копії однакових базових бібліотек, що нівелює всі переваги оптимізації.

Для розв'язання цієї проблеми в сучасних системах на базі Module Federation застосовується строга конфігурація спільних залежностей.[3] Цей механізм дозволяє хост-контейнеру реєструвати завантажені бібліотеки у спільному просторі пам'яті. Коли новий мікрокомпонент запитує залежність, рушій перевіряє її наявність у хост-системі і, за збігу версій, використовує існуючий екземпляр замість повторного мережового запиту. Додатково для компенсації мережових затримок під час асинхронного підвантаження віддалених UI-компонентів система повинна імплементувати механізми резервного відображення і стратегії агресивного кешування зкомпільованих мікрофронтендів на рівні мереж доставки контенту.

References

1. Ferreira, A., et al. Microfront-End: Systematic Mapping. Proceedings of the 20th International Conference on Web Information Systems and Technologies (WEBIST 2024), SciTePress, 2024, pp. 120-131.
2. Lando, B., & Hasselbring, W. Toward Bundler-Independent Module Federations: Enabling Typed Micro-Frontend Architectures. arXiv preprint arXiv:2501.18225, 2025.
3. Kozlov, A. Using Micro Frontends for Modular Architecture of Web Applications. ULETE Open Access Journals, Vol. 1, No. 2, 2024.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.19

Viktor Ralenko,
Yevhenii Stoiev

APPLICATION OF MICRO FRONTEND ARCHITECTURE FOR CREATING SCALABLE USER INTERFACES

The thesis explores the use of microfrontend architecture to create scalable user interfaces based on the React ecosystem. The principles of decomposition of monolithic web applications into independent microfrontends with a clearly limited area of responsibility are analyzed. It is substantiated that such an approach significantly optimizes parallel development and deployment of applications.

Special attention is paid to methods of reliable encapsulation of logic and styles: it is demonstrated how support for CSS modularization technologies allows avoiding visual display conflicts between independent components during their integration..

Key words: microfrontend, React, CSS modularization, interface scalability, frontend development.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Віктор Раленко, викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ralenko.v@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0009-4161-8468>.

Viktor Ralenko, Lecturer of the Software Engineering Department of the Computer Science Faculty of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ralenko.v@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0009-4161-8468>

Євгеній Стоєв, викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: stoiev.yevhenii@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8999-2267>.

Yevhenii Stoiev, Lecturer of the Software Engineering Department of the Computer Science Faculty of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: stoiev.yevhenii@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8999-2267>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.20

Віктор Раленко,
Марина Фаленкова

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВІ МЕХАНІЗМІВ УВАГИ ДЛЯ СЕМАНТИЧНОГО АНАЛІЗУ ТЕКСТУ

У тезах досліджується застосування еволюція методів семантичного і сентиментального аналізу тексту з акцентом на подолання архітектурних обмежень традиційних статичних векторних просторів та рекурентних нейронних мереж. Проаналізовано здатність багатомакушкової уваги глобально моделювати семантичні зв'язки, що суттєво підвищує точність розпізнавання складних лінгвістичних патернів, імпліцитної семантики та іронії в зашумлених неструктурованих даних.

Окрема увага приділяється вразливості інформаційної безпеки моделей до текстових змагальних атак і методам підвищення стійкості систем класифікації за допомогою змагального навчання.

Ключові слова: семантичний аналіз тексту, сентиментальний аналіз, механізм уваги, обробка природної мови.

Семантичний аналіз тексту тривалий час спирався на класичні методи дистрибутивної семантики та статичні векторні представлення, такі як Word2Vec, GloVe або FastText. Хоча ці технології забезпечили значний прогрес у вирішенні завдань обробки природної мови, вони мають фундаментальне архітектурне обмеження: незалежність векторів від контексту.

У класичних моделях кожній лексемі відповідає єдиний статичний вектор у багатовимірному просторі, незалежно від її семантичного оточення. Це створює критичну проблему під час обробки явищ полісемії та омонімії. Наприклад, лексема «ключ» у контекстах криптографічного алгоритму, будівельного інструменту або журавлиної зграї матиме абсолютно ідентичне математичне представлення. Нездатність моделі диференціювати значення слова залежно від контексту суттєво знижує точність класифікації тональності та вилучення сутностей.

Наступним етапом еволюції стали рекурентні нейронні мережі та архітектури довгої короткострокової пам'яті, які дозволили обробляти текст як послідовність. Проте ці алгоритми аналізують дані строго лінійно. Під час обробки розлогих текстових конструкцій чи складних підрядних речень рекурентні мережі стикаються з проблемою згасання градієнта та "забування" раннього контексту: модель втрачає семантичний зв'язок між словами, що знаходяться на значній відстані одне від одного. Таким чином, послідовна природа обчислень унеможливило їхню ефективну паралелізацію на сучасних графічних процесорах. Через наявні обмеження зумовлена гостра необхідність переходу до нової архітектурної парадигми. Сучасні системи сентиментального та семантичного аналізу потребують механізмів, які здатні глобально оцінювати весь контекст документа одночасно, встановлюючи прямі логічні зв'язки між усіма елементами тексту незалежно від їхньої лінійної позиції.

Відповіддю на обмеження рекурентних мереж стало впровадження механізму уваги, який кардинально змінив парадигму обробки природної мови. Фундаментальна ідея цього підходу полягає у відмові від послідовного "читання" тексту на користь глобального обчислення залежностей. Замість того, щоб покладатися на єдиний прихований стан пам'яті, який неминуче деградує на довгих дистанціях, механізм уваги дозволяє моделі під час обробки кожного окремого слова динамічно оцінювати ступінь значущості всіх інших слів у текстовій послідовності.

Математичним ядром механізму уваги вважається механізм внутрішньої уваги. Під час роботи з текстом кожен токен лінійно проектується у три вектори: запит, ключ та значення. Шляхом обчислення скалярного добутку між матрицею запитів поточного слова та матрицею ключів усіх інших слів, система генерує нормалізовану матрицю ваг, які визначають, яку саме частку інформації від інших лексем потрібно включити до фінального векторного представлення аналізованого слова. Завдяки цьому забезпечується миттєва і глибока контекстуалізація, що значить що вектор слова формується виключно на основі його безпосереднього

семантичного оточення, завдяки чому ефективно вирішується проблема омонімії і зняття лексичної багатозначності.

Оскільки природна мова характеризується складною багатовимірною ієрархією яка складається з морфології, синтаксису, семантики і прагматики, недостатньо просто використовувати єдину матрицю уваги. Для вирішення завдання семантичного аналізу природної мови застосовується архітектура багатомасштабової уваги. Метод багатомасштабової уваги передбачає виконання паралельних обчислень Self-Attention у кількох незалежних підпросторах, так званих "головах". Кожна незалежна "голова" в процесі навчання самостійно налаштовується на розпізнавання специфічних лінгвістичних патернів. Наприклад, перша голова може спеціалізуватися виключно на відстеженні зв'язків підмета і присудка, розділених підрядними реченнями, друга буде моделювати семантичну близькість, а третя ідентифікуватиме маркери емоційного забарвлення або заперечення. На фінальному етапі результати роботи всіх паралельних голів конкатенуються і модель формує максимально насичене, багаторівневе представлення змісту речення, яке критично важливе для точного семантичного і сентиментального аналізу складних текстів.[1]

Інтеграція механізмів уваги в архітектуру трансформерів призвела до появи мовних моделей репрезентації нового покоління, таких як BERT, RoBERTa та їхніх похідних. Головним здобутком цих систем вважається здатність генерувати глибоко контекстуалізовані ембедінги. На відміну від класичних словникових підходів, де лексема завжди має фіксований вектор, трансформери обчислюють векторне представлення слова динамічно, під час проходження вхідних даних через приховані шари нейромережі, через це модель формує унікальний математичний «підпис» для кожного слова, який об'єднує синтаксичні та семантичні нюанси всього речення в цілому. Ця архітектурна властивість забезпечила якісний стрибок у вирішенні складних завдань семантичного аналізу які раніше вважалися проблемними для методів машинного навчання, оскільки, завдяки двонаправленому та глобальному оцінюванню контексту, моделі на основі уваги здатні ефективно розпізнавати приховані лінгвістичні патерни, імпліцитну семантику, а також складні конструкції з подвійним запереченням.

Особливе значення механізм уваги має для детекції сарказму та іронії - однієї з найскладніших задач NLP.[2] Наприклад, у висловлюванні з соціальних мереж "Який 'чудовий' сервіс, довелося чекати лише три години", класичні лексичні аналізатори можуть хибно класифікувати текст як позитивний через наявність слова "чудовий", на відміну від механізму Multi-Head attention, який встановлює математично сильну вагу зв'язку між позитивним прикметником і негативним контекстом тривалого очікування, завдяки чому класифікатор коректно розпізнає семантичну суперечність і визначає тональність висловлювання як різко негативну.

Практичне застосування систем семантичного та сентиментального аналізу переважно відбувається в умовах обробки неструктурованих або «зашумлених» даних, таких як, наприклад, коментарів у соціальних мережах. Тексти такого формату характеризуються нетиповою пунктуацією, граматичними відхиленнями, специфічним сленгом і використанням невербальних маркерів. Архітектури на основі механізмів уваги демонструють високу адаптивність до подібних умов завдяки алгоритмам токенизації на рівні підслів у поєднанні з динамічним розподілом ваг, трансформери здатні ефективно ігнорувати семантично порожній «шум», фокусуючи обчислювальні ресурси безпосередньо на ключових індикаторах тональності.

Попри визначну точність у стандартних бенчмарках, фундаментальною проблемою безпеки сучасних моделей уваги є їхня вразливість до змагальних атак. Глибинний аналіз внутрішніх механізмів роботи цих архітектур свідчить, що системи детекції тональності можуть бути скомпрометовані методами рекурсивного перефразування або цілеспрямованими лексичними підмінами.[3] Змагальні атаки генерують тексти, які зберігають вихідну семантику для людини-реципієнта, але містять мікроструктурні зміни, які змушують паралельні голови уваги хибно перерозподілити вагові коефіцієнти, через що модель «сліпне» щодо справжніх маркерів сентименту та видає хибну класифікацію. Вирішення цієї критичної проблеми вимагає впровадження спеціалізованих методів стабілізації. Для підвищення стійкості моделей до семантичних маніпуляцій активно застосовується змагальне навчання, процес якого передбачає свідоме включення атаківаних і перефразованих зразків тексту до тренувальної вибірки, завдяки чому ландшафт функції втрат стає оптимальним і змушує механізм уваги формувати більш узагальнені й інваріантні векторні представлення, які стійкі до синтаксичних та лексичних флуктуацій вхідного потоку даних.

Завдяки переходу від традиційних статичних векторних просторів до архітектур на основі механізмів уваги відбувся фундаментальний якісний стрибок у галузі обробки природної мови. Використання моделей класу Transformer і генерація контекстуалізованих ембедінгів дозволяє обчислювальним системам відійти від простої лексичної частотності та перейти до глибокого аналізу синтаксичних і семантичних зв'язків у межах усього документа, завдяки чому забезпечується висока точність розв'язання нетривіальних завдань сентиментального аналізу, які включають в себе детекції сарказму, іронії та імпліцитного емоційного забарвлення у зашумлених масивах даних. Водночас практична імплементація таких моделей супроводжується низкою інженерних

викликів, головними з яких є високі обчислювальні витрати на етапі інференсу та архітектурна вразливість до змагальних атак. Однак, як свідчить аналіз, ці обмеження ефективно нівелюються за рахунок застосування методів змагального навчання та оптимізації гіперпараметрів паралельних голів уваги.

У підсумку, алгоритми на основі механізмів уваги на сьогодні найбільш адаптивні і ефективні математичні інструментарії для побудови стійких систем семантичного аналізу тексту. Їхня здатність глобально моделювати контекст і стійкість до синтаксичних флуктуацій роблять ці архітектури безальтернативним стандартом для сучасних досліджень у сфері штучного інтелекту та розуміння природної мови.

References

1. Arunarani A.R. Bidirectional LSTM and self-attention mechanisms based multi-label sentiment analysis. International Journal of System of Systems Engineering. 2025. Vol. 15, no. 1. P. 67-78. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJSSE.2025.144565>
2. Dubey Parul, Dubey Pushkar, Bokoro Pitshou N. Unpacking Sarcasm: A Contextual and Transformer-Based Approach for Improved Detection. Computers. 2025. Vol. 3, no. 14. Art. 95. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers14030095>
3. Shaw Laxmi, Ansari Mohammed Wasim, Tahir Ekin. Adversarial natural language processing: overview, challenges, and policy implications. Data & Policy. 2025. Vol. 7. P. e64. DOI: <https://doi.org/10.1017/dap.2025.10030>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.20

Viktor Ralenko,
Maryna Falenkova

APPLICATION MODELS BASED ON ATTENTION MECHANISMS FOR SEMANTIC TEXT ANALYSIS

The thesis explores the application of the evolution of methods for semantic and sentimental text analysis with an emphasis on overcoming the architectural limitations of traditional static vector spaces and recurrent neural networks. The ability of multi-peak attention to globally model semantic connections is analyzed, which significantly increases the accuracy of recognizing complex linguistic patterns, implicit semantics, and irony in noisy unstructured data.

Special attention is paid to the vulnerability of information security models to text adversarial attacks and methods for increasing the stability of classification systems using adversarial learning.

Key words: semantic text analysis, sentiment analysis, attention mechanism, natural language processing.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Віктор Раленко, викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ralenko.v@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0009-4161-8468>.

Viktor Ralenko, Lecturer of the Software Engineering Department of the Computer Science Faculty of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ralenko.v@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0009-4161-8468>

Марина Фаленкова, старша викладачка кафедри інженерії програмного забезпечення Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: marynakotova@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7797-0142>.

Maryna Falenkova, Senior lecturer of the Software Engineering Department of the Computer Science Faculty of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: marynakotova@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7797-0142>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.21

Максим Салютін,
Юрій Кондратенко,
Євген Сіденко

INT8-КВАНТИЗОВАНІ МОДЕЛІ YOLO26 ДЛЯ МОБІЛЬНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ

У роботі розглянуто задачу енергоефективного розпізнавання військових об'єктів на мобільних пристроях із використанням моделей сімейства YOLO26. Для експериментального дослідження використано багатокласовий набір даних військової техніки, що містить 11 класів об'єктів. Попередньо виконано очищення помилкових анотацій та балансування класового розподілу. Навчено чотири конфігурації моделей YOLO26, які відрізняються масштабом архітектури та роздільною здатністю вхідного зображення. Якість моделей оцінено за метриками Precision, Recall, F1-score, mAP@0.5 та mAP@0.5–0.95, а обчислювальну ефективність – за часом інференсу та FPS. Додатково моделі було квантизовано до формату INT8 і розгорнуто на Android-пристроях для оцінювання реальної мобільної продуктивності та енергоспоживання. Отримані результати показали, що компактні конфігурації YOLO26n забезпечують раціональний компроміс між точністю, швидкодією та енергоефективністю.

Ключові слова: YOLO26, військові об'єкти, комп'ютерний зір, мобільне розпізнавання, INT8-квантизація, енергоефективність, Android.

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій системи комп'ютерного зору відіграють важливу роль у задачах автоматизованого аналізу візуальних даних. Особливої актуальності такі підходи набувають у сфері розпізнавання військових об'єктів, де своєчасне виявлення та класифікація техніки може бути використане для підтримки ситуаційної обізнаності, моніторингу місцевості та прийняття оперативних рішень. На відміну від традиційних методів обробки зображень, сучасні архітектури комп'ютерного зору здатні автоматично виділяти складні просторові ознаки об'єктів, що забезпечує вищу точність і стійкість до змін умов зйомки, масштабу, фону та часткового перекриття цілей.

Одним із найбільш поширених підходів до детекції об'єктів у реальному часі є використання моделей сімейства YOLO, які поєднують достатньо високу точність розпізнавання зі швидким інференсом [1]. Це робить їх придатними для задач, де необхідна оперативна обробка відеопотоку або послідовності зображень. Водночас застосування таких моделей у мобільних або edge-сценаріях супроводжується низкою обмежень. Мобільні пристрої мають обмежену обчислювальну потужність, пропускну здатність пам'яті та запас енергії, тому використання високоточних, але ресурсомістких моделей може призводити до зниження частоти обробки кадрів, перегріву пристрою та швидкого розряду батареї.

У межах даного дослідження розглядається застосування моделей YOLO26 для задачі мобільного розпізнавання військових об'єктів. Актуальність роботи полягає у необхідності визначення такої конфігурації моделі, яка забезпечує раціональний компроміс між якістю детекції, швидкістю обробки кадрів та енергетичними витратами під час роботи на Android-пристроях.

Для проведення експериментального дослідження використано багатокласовий набір даних військової техніки, орієнтований на задачі автоматизованого виявлення об'єктів на зображеннях. Набір містить 11 класів військових об'єктів: танк, бойова машина піхоти, бронетранспортер, інженерна машина, ударний гелікоптер, транспортний гелікоптер, штурмовий літак, транспортний літак, зенітна установка, буксирована артилерія та самохідна артилерія [2]. Такий класовий склад дозволяє оцінити ефективність моделей YOLO26 у задачі розпізнавання об'єктів, які відрізняються за розмірами, формою, ракурсом зйомки та візуальними ознаками.

Під час попереднього аналізу набору даних було виявлено суттєвий дисбаланс між класами. Частина категорій була представлена значно більшою кількістю об'єктів, що могло спричинити зміщення моделі в бік домінантних класів і знизити якість розпізнавання малопредставлених категорій. Крім того, у наборі були виявлені помилкові

анотації у форматі YOLO, координати яких виходили за межі нормованого діапазону. Такі мітки було видалено з метою підвищення коректності навчальної вибірки. Для зменшення впливу дисбалансу застосовано комбінований підхід до балансування даних. Для надмірно представлених класів використано undersampling, що дозволило обмежити кількість об'єктів домінантних категорій [3]. Для малопредставлених класів застосовано oversampling із використанням аугментацій (рис. 1).

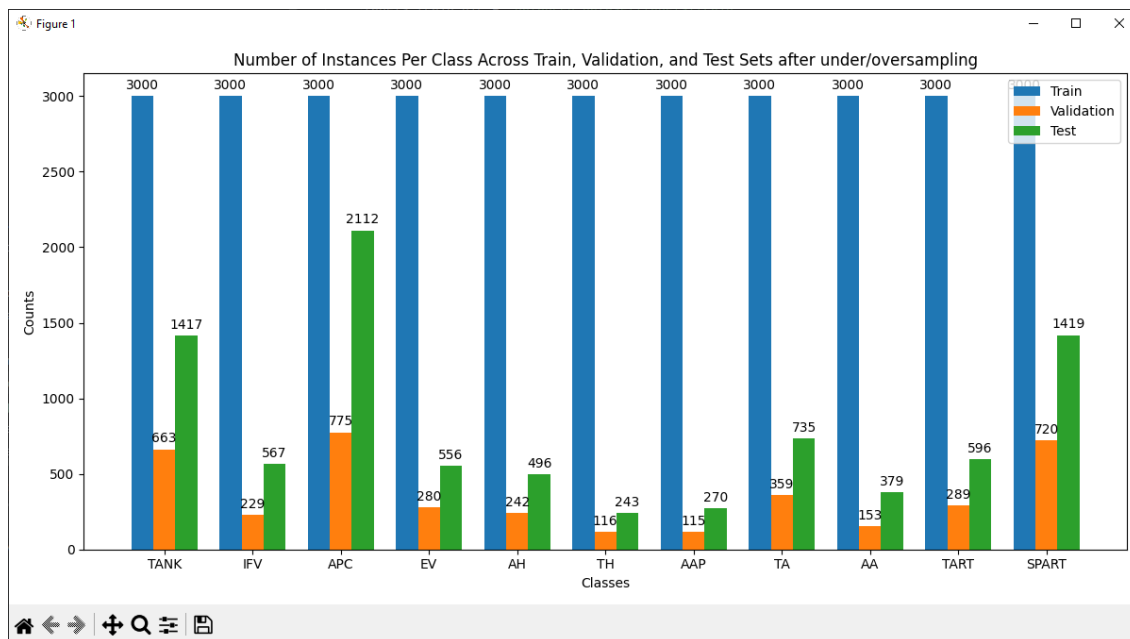


Рис. 1. Набір даних після застосування under-/oversampling методів.

Джерело: сформовано автором

У межах дослідження було навчено чотири конфігурації моделей YOLO26, які відрізнялися масштабом архітектури та роздільною здатністю вхідного зображення. Основну увагу зосереджено на компактній моделі YOLO26n, оскільки вона має меншу кількість параметрів і є більш придатною для мобільного та edge-інференсу. Додатково було розглянуто модель YOLO26s, яка має більшу обчислювальну складність, але потенційно забезпечує вищу точність детекції.

Усі моделі навчалися протягом 100 епох із використанням оптимізатора AdamW, розміру батчу 32 та базових аугментацій, зокрема Mosaic, HSV-перетворень, горизонтального віддзеркалення та масштабування. Після навчання моделі було оцінено за метриками Precision, Recall, mAP@0.5 та mAP@0.5–0.95. Для аналізу обчислювальної ефективності додатково вимірювався час інференсу на CPU та середній FPS. Надалі моделі було оптимізовано шляхом INT8-квантизації, що дозволяє зменшити обчислювальні витрати та підвищити придатність моделей до розгортання на Android-пристроях.

Отримані результати показують, що збільшення роздільної здатності для YOLO26n поступово підвищує точність детекції, однак приріст є відносно невеликим. Модель YOLO26s демонструє найвищі значення mAP, проте має значно більший час інференсу та нижчий FPS. Тому для мобільного сценарію найбільш доцільними є компактні конфігурації YOLO26n, які забезпечують кращий баланс між точністю та швидкістю (табл. 1).

Таблиця 1.

Результати навчання YOLO26 і інференс моделей на CPU

Модель	Розмір зображення	mAP@0.5	mAP@0.5–0.95	Precision	Recall	Час інференсу CPU, мс	FPS
YOLO26n	512	0.971	0.788	0.961	0.933	18.03	55.43
YOLO26n	640	0.975	0.801	0.962	0.948	18.11	55.22
YOLO26n	768	0.979	0.808	0.975	0.942	18.18	55.12
YOLO26s	640	0.982	0.825	0.969	0.956	49.02	20.01

Джерело: сформовано автором

Збільшення роздільної здатності вхідного зображення для YOLO26n до 640×640 та 768×768 забезпечило поступове покращення метрик точності. Зокрема, для YOLO26n 640 значення mAP@0.5 становило 0.975, а для YOLO26n 768 – 0.979. Водночас приріст точності був відносно помірним, тоді як швидкодія залишалася майже незмінною – близько 55 FPS. Це свідчить про стабільність компактної архітектури YOLO26n та її ефективність для задач реального часу.

Найвищу точність серед досліджених моделей продемонструвала YOLO26s з розміром вхідного зображення 640×640. Для цієї конфігурації отримано mAP@0.5 = 0.982 та mAP@0.5–0.95 = 0.825. Такі результати пояснюються більшою кількістю параметрів (у 2.5 рази більше) і вищою здатністю моделі до виділення складних ознак об'єктів. Однак підвищення точності супроводжувалося суттєвим зростанням часу інференсу до 49.02 мс і зниженням продуктивності до 20 FPS. Отже, YOLO26s є доцільною для сценаріїв, де пріоритетом є максимальна точність, але її застосування на мобільних пристроях може бути обмежене через більші обчислювальні витрати.

Для якісної перевірки роботи моделей було виконано тестування на зображеннях, які не використовувалися під час навчання (рис. 2). Приклади детекції показали, що модель YOLO26n 512×512 здатна коректно локалізувати та класифікувати військові об'єкти різних типів, зокрема бронетехніку, артилерію та повітряні цілі. Модель зберігає працездатність у сценах із різними масштабами об'єктів, складним фоном та частковими перекриттями. Це підтверджує її узагальнюючу здатність і практичну придатність для подальшого мобільного розгортання.

Після завершення навчання моделі було квантизовано до формату INT8 та інтегровано в Android-застосунок для перевірки їх роботи в умовах мобільного інференсу. Застосування INT8-квантизації дозволило зменшити розмір моделей майже вдвічі при незначній втраті точності. Для моделей YOLO26 середнє зниження mAP@0.5 після квантизації становило близько 0,0058, що є прийнятним для практичного використання в задачах розпізнавання військових об'єктів.

Мобільне тестування проводилося в режимі обробки живого відеопотоку з камери Android-пристрою. Такий підхід є більш показовим, ніж тестування лише на статичних зображеннях, оскільки дозволяє оцінити поведінку моделі в умовах, наближених до реального використання. Основними критеріями оцінювання були середній FPS, стабільність інференсу, витрати заряду батареї та інтегральна ефективність моделі (рис. 3). Для кожної квантизованої конфігурації аналізувалося не тільки те, наскільки точно вона розпізнає об'єкти, а й те, наскільки стабільно вона працює протягом тривалого часу на пристрої з обмеженими ресурсами.

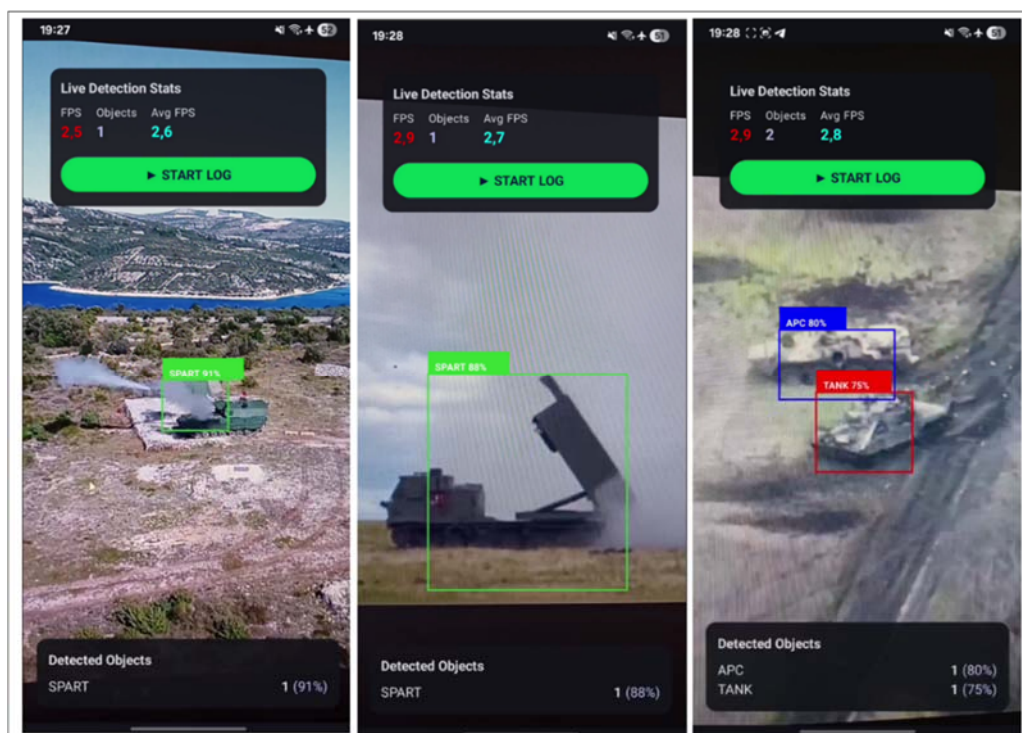


Рис. 2. Тестування YOLO26n 512 на тестовий вибірці.

Джерело: сформовано автором

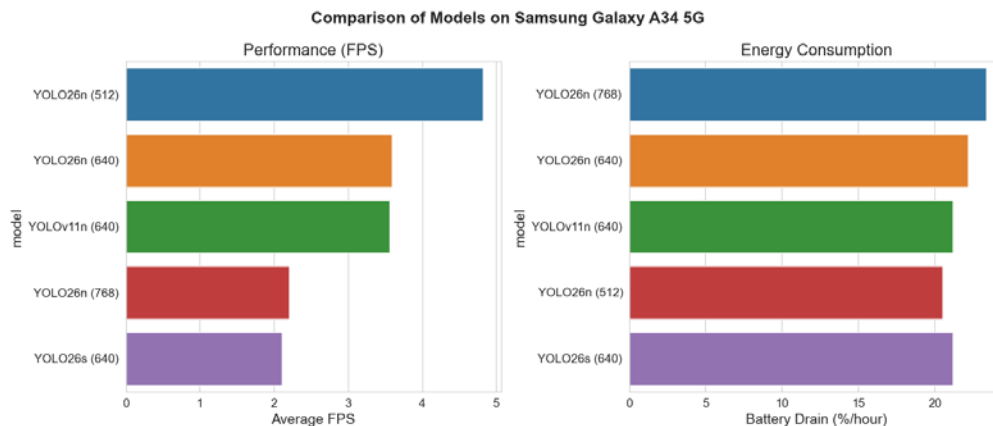


Рис. 3. Результати споживання та продуктивності навчених моделей на мобільному пристрої.
Джерело: сформовано автором

Узагальнений аналіз мобільного тестування підтвердив, що оцінювання моделей лише за метриками точності є недостатнім для задач edge та mobile deployment. У таких сценаріях модель повинна забезпечувати не максимальне, а раціональне співвідношення між mAP, FPS і витратами батареї. Отже, INT8-квантизовані моделі YOLO26n можуть розглядатися як перспективна основа для мобільних систем розпізнавання військових об'єктів у реальному часі, де критичними є швидкість реакції, стабільність інференсу та тривалість автономної роботи пристрою.

References

1. Leiva, F., Rebeaud, S.G., & Christen, D. (2026). Real-time identification and quantification of apple scab on fruit in preharvest and postharvest conditions using YOLO11: a deep learning approach. *Plant Methods*, 22, 29. <https://doi.org/10.1186/s13007-026-01508-7>.
2. Žigulić, N., Glučina, M., Lorencin, I., & Matika, D. (2024). Military Decision-Making Process Enhanced by Image Detection. *Information*, 15, 11. <https://doi.org/10.3390/info15010011>.
3. Zhang, S., Zhu, D., Yung, K., et al. (2025). Balanced X-ray Security Dataset and Enhanced YOLO for Contraband Detection. *Scientific Data*, 12, 2041. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-06322-9>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.21

Maksym Saliutin,
Yuriy Kondratenko,
Ievgen Sidenko

INT8-QUANTIZED YOLO26 MODELS FOR MOBILE MILITARY OBJECT RECOGNITION

The paper considers the problem of energy-efficient recognition of military objects on mobile devices using models of the YOLO26 family. For the experimental study, a multi-class dataset of military equipment containing 11 classes of objects was used. False annotation cleaning and class distribution balancing were previously performed. Four configurations of YOLO26 models were trained, which differ in the scale of the architecture and the resolution of the input image. The quality of the models was evaluated by the metrics Precision, Recall, F1-score, mAP@0.5 and mAP@0.5–0.95, and the computational efficiency was evaluated by the inference time and FPS. Additionally, the models were quantized to the INT8 format and deployed on Android devices to evaluate real mobile performance and power consumption. The results obtained showed that the compact configurations of YOLO26n provide a rational compromise between accuracy, speed, and energy efficiency.

Key words: YOLO26, military objects, computer vision, mobile recognition, INT8-quantization, energy efficiency, Android.

Відомості про автора / Information about the Author

Максим Салютін, аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: salyutin1@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0003-0788-0012>.

Maksym Salyutin, PhD student of the Intelligent Information Systems Department at the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: salyutin1@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0003-0788-0012>.

Юрій Кондратенко, д-р техн. наук, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yuriy.kondratenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7736-883X>.

Yuriy Kondratenko, Doctor of Science, Professor of the Intelligent Information Systems Department at the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yuriy.kondratenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7736-883X>.

Євген Сіденко, канд. техн. наук, завідувач кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ievgen.sidenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6496-2469>.

Ievgen Sidenko, PhD, Head of the Intelligent Information Systems Department at the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ievgen.sidenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6496-2469>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.22

Віктор Сенішин,
Гліб Горбань

АРХІТЕКТУРНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ СКАЛЬОВАНИХ СИСТЕМ ОБРОБКИ ВІДЕОКОНТЕНТУ НА БАЗІ .NET

Тези представляють комплексний аналіз архітектурних рішень для побудови скальованих розподілених систем обробки відео у високонавантажених вебпорталах. Досліджується проблематика монолітних застосунків, де ресурсомісткі задачі з транскодування медіафайлів спричиняють критичне навантаження на обчислювальні потужності (CPU/RAM) та знижують загальну відмовостійкість системи. Обґрунтовується доцільність переходу до мікросервісної архітектури шляхом делегування важких обчислювальних операцій ізольованим фоновим воркерам. Розглянуто практичну реалізацію моделі асинхронної взаємодії за допомогою брокера повідомлень RabbitMQ та інтеграцію мультимедійного фреймворку FFmpeg у середовище .NET. Доведено, що такий підхід, у поєднанні з сучасними механізмами управління пам'яттю в .NET, забезпечує безперебійну роботу основного вебсервера, гнучке горизонтальне масштабування та високу надійність програмної інфраструктури.

Ключові слова: мікросервісна архітектура, відеохостинг, .NET, RabbitMQ, FFmpeg, асинхронна обробка, транскодування.

Сучасний етап розвитку вебтехнологій характеризується стрімким зростанням обсягів мультимедійного контенту. Створення сервісів, здатних приймати, обробляти та транслювати тисячі відеофайлів одночасно, висуває жорсткі вимоги до масштабованості, продуктивності та відмовостійкості серверної інфраструктури. Основною проблемою монолітних застосунків під час роботи з медіа є екстремальне навантаження на обчислювальні ресурси (CPU та GPU) під час виконання процесів транскодування. Це призводить до блокування потоків вебсервера, збільшення часу відгуку для кінцевих користувачів, погіршення загального досвіду користування сервісом та потенційного падіння всієї системи. Дослідження ізольованих архітектурних рішень для обробки відео є критично важливим для інженерії програмного забезпечення високонавантажених систем.

Транскодування відео, що включає зміну роздільної здатності, бітрейту, застосування нових кодеків та створення прев'ю-зображень, є тривалим та ресурсоемним процесом. Він принципово відрізняється від швидких операцій введення-виведення (Input/Output operations), які є типовими для стандартних RESTful API. У контексті розробки платформ, таких як відеохостинг, необхідно забезпечити безперебійну роботу основного функціоналу: авторизації, підсистеми коментарів, механізмів пошуку та окремих модулів, таких як верифікація документів (Acknowledge settings). Виконання важких математичних обчислень у тому ж процесі, що й обробка HTTP-запитів, є антипатерном. У сучасних високонавантажених системах для вирішення цієї проблеми активно застосовуються черги повідомлень, асинхронна обробка задач та окремі воркери для виконання ресурсоемних операцій. Це дозволяє мінімізувати вплив транскодування на продуктивність основного сервісу та забезпечити стабільний користувацький досвід навіть за умов значного навантаження на систему.

Таким чином, ефективна організація процесів обробки мультимедійного контенту потребує впровадження окремих сервісів або мікросервісної архітектури, у межах якої задачі транскодування виконуються незалежно від основного вебзастосунку. Такий підхід дозволяє підвищити масштабованість системи, забезпечити стабільність роботи критично важливих компонентів та оптимізувати використання обчислювальних ресурсів сервера. Крім того, ізоляція процесів обробки відео та створює передумови для гнучкого горизонтального масштабування застосунку, спрощує моніторинг поточного навантаження та підвищує загальну відмовостійкість програмної інфраструктури. Це особливо актуально в умовах постійного зростання кількості активних користувачів і підвищення вимог до якості відтворення потокового мультимедійного контенту.

Таблиця 1.

Порівняння монолітного та мікросервісного підходів до обробки відео

Критерій	Монолітна архітектура	Мікросервісна архітектура (Worker)
Розподіл ресурсів	Спільне використання CPU/RAM вебсервером та процесом конвертації	Повна ізоляція: вебсервер обробляє лише I/O, Worker забирає CPU
Масштабування	Складне, вимагає дублювання всього застосунку	Незалежне (горизонтальне) масштабування лише воркерів
Відмовостійкість	Збій FFmpeg або OutOfMemory призводить до падіння всього API	Збій ізолюваний в межах одного контейнера-воркера

Джерело: сформоване авторами на основі [3, 4]

Для організації стабільної комунікації між основним вебзастосунком та сервісом обробки доцільно використовувати патерн асинхронної черги повідомлень (Message Queue) за допомогою RabbitMQ. Процес взаємодії виглядає наступним чином:

- Після завантаження оригінального файлу користувачем, API зберігає його у тимчасове сховище та публікує повідомлення у RabbitMQ Exchange.
- Повідомлення містить необхідні метадані: унікальний ідентифікатор, шлях до файлу, цільові формати та профіль користувача.
- Сервіс-воркер (Consumer) підписується на чергу та вичитує завдання. Використання налаштування Prefetch Count = 1 гарантує, що один екземпляр сервісу не забере на себе більше одного відеофайлу одночасно, уникаючи перевантаження пам'яті.
- Після успішного транскодування воркер надсилає підтвердження (Acknowledgment), і завдання видаляється з черги.

Платформа .NET надає потужні інструменти для створення фонових служб. Використання інтерфейсу IHostedService та базового класу BackgroundService дозволяє елегантно інтегрувати цикл обробки повідомлень з RabbitMQ у стандартний контейнер інверсії управління (DI Container).

Безпосередня обробка медіафайлів делегується утиліті FFmpeg. Взаємодія платформи .NET із зовнішнім процесом FFmpeg здійснюється через клас System.Diagnostics.Process. Це дозволяє гнучко передавати аргументи командного рядка для нарізки відео (chunking) під формати HLS або DASH, транскодування кодеками H.264/H.265 та генерації статичних кадрів (thumbnails).

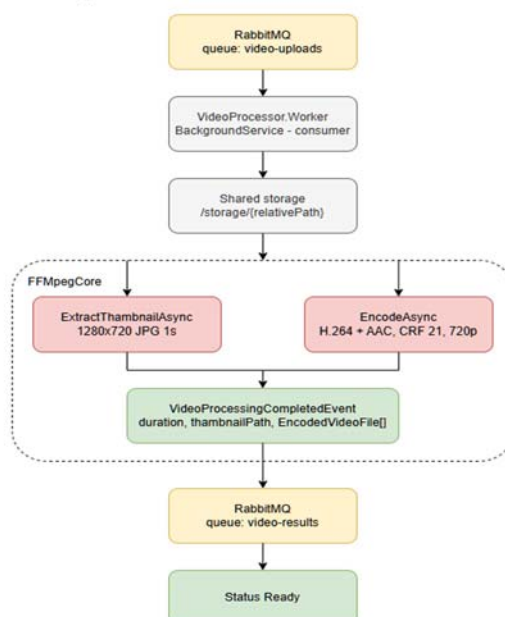


Рис. 1. Схема внутрішнього pipeline сервісу VideoProcessor.Worker

Джерело: сформоване автором на основі [1, 2]

Під час розробки високонавантажених медіасистем критично важливо мінімізувати навантаження на Garbage Collector. Використання сучасних можливостей .NET, таких як `Span<T>` та `Memory<T>` для парсингу виводу FFmpeg або роботи з бінарними потоками, дозволяє значно знизити алокацію пам'яті в купі (Heap). Крім того, застосування `System.Threading.Channels` може слугувати ефективним внутрішнім механізмом передачі даних між потоком, що зчитує завдання з бази даних чи брокера, та потоками, які відповідають за їхню логічну обробку та моніторинг.

Розподілена архітектура, де ресурсомісткі задачі транскодування відео виділені в окремі мікросервіси, є єдиним дієвим підходом для побудови сучасних відеохостингів. Симбіоз продуктивності платформи .NET для оркестрації та управління потоками, надійності RabbitMQ для гарантованої доставки повідомлень та універсальності FFmpeg для низькорівневої роботи з медіакодеками забезпечує створення систем з високим рівнем масштабованості та відмовостійкості.

Проведений аналіз підтверджує, що для забезпечення стабільної роботи високонавантажених медіасистем необхідний перехід від монолітних до мікросервісних архітектурних рішень. Фізичне відокремлення ресурсомістких задач із транскодування відео в окремі фонові сервіси повністю усуває ризики блокування основного вебзастосунку та виснаження серверних ресурсів. Комплексне використання брокера повідомлень RabbitMQ для побудови надійної асинхронної черги завдань, фреймворку FFmpeg для безпосередньої обробки медіафайлів, а також інструментарію платформи .NET (`BackgroundService`, `Channels`, `Span<T>`) для тонкої оптимізації управління пам'яттю утворюють високоефективний архітектурний симбіоз. Запропонований підхід гарантує безперебійну роботу критичного користувацького функціоналу, створює передумови для гнучкого горизонтального масштабування та суттєво підвищує загальну відмовостійкість програмної інфраструктури сучасних відеохостингів.

References

1. RabbitMQ Tutorials and Best Practices for Reliable Delivery. RabbitMQ Team. 2025. URL: <https://www.rabbitmq.com/tutorials> (дата звернення: 24.05.2026).
2. FFmpeg Filters and Transcoding Guides. FFmpeg Documentation. 2025. URL: <https://ffmpeg.org/documentation.html> (дата звернення: 24.05.2026).
3. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. 2nd ed. O'Reilly Media, 2021. 614 p.
4. De la Torre C., Wagner B., Rousos M. .NET Microservices: Architecture for Containerized .NET Applications. Microsoft, 2023. 340 p. Microsoft.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.22

Viktor Senishyn,
Glib Horban

ARCHITECTURAL APPROACHES TO BUILDING SCALABLE VIDEO PROCESSING SYSTEMS BASED ON .NET

The theses present a comprehensive analysis of architectural solutions for building scalable distributed video processing systems in high-load web portals. The problems of monolithic applications, where resource-intensive media transcoding tasks cause critical loads on computing power (CPU/RAM) and reduce overall system fault tolerance, are investigated. The expediency of transition to a microservice architecture by delegating heavy computational operations to isolated background workers is substantiated. The practical implementation of an asynchronous interaction model using the RabbitMQ message broker and the integration of the FFmpeg multimedia framework into the .NET environment is considered. It is proven that this approach, combined with modern memory management mechanisms in .NET, ensures the uninterrupted operation of the main web server, flexible horizontal scaling, and high reliability of the software infrastructure.

Key words: *microservice architecture, video hosting, .NET, RabbitMQ, FFmpeg, asynchronous processing, transcoding.*

Відомості про авторів / Information about the Authors

Віктор Сенішин, здобувач вищої освіти, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: v.senishyn2@gmail.com. ORCID ID: 0009-0006-0492-267X.

Viktor Senishyn, student, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: v.senishyn2@gmail.com. ORCID ID: 0009-0006-0492-267X.

Гліб Горбань, доцент кафедри ПЗ, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. ORCID ID: 0000-0002-6512-3576.

Glib Horban, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. ORCID ID: 0000-0002-6512-3576.

© В. Сенішин, Г. Горбань

Стаття отримана редакцією 27.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.23

Микита Смоленський,
Євген Сіденко,
Юрій Кондратенко

ПРОТОТИПУВАННЯ МОБІЛЬНОГО RFID-МОДУЛЯ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МЕДИЧНОГО ЗАКЛАДУ

У роботі представлено функціональний прототип мобільного RFID-модуля для медичної інформаційної системи, розробленого як клієнтський застосунок для взаємодії медичного персоналу із серверною платформою ідентифікації пацієнтів. Реалізовано мобільний інтерфейс для RFID-ідентифікації пацієнтів, перегляду медичних записів та навігації між основними клінічними сценаріями. Функціональний прототип підтримує сценарії RFID-сканування, перегляду інформації про пацієнта, історії відвідувань та візуалізації медичних статусів. Запропонований підхід забезпечує оперативний доступ до клінічних даних і спрощує взаємодію персоналу з цифровою інфраструктурою медичного закладу. Отримані результати демонструють перспективність використання мобільних RFID-рішень у сучасних медичних інформаційних системах.

Ключові слова: RFID, мобільний модуль, медична інформаційна система, Android, ідентифікація пацієнтів, цифрова медицина, UI/UX.

Сучасні медичні інформаційні системи активно інтегрують технології автоматичної ідентифікації пацієнтів та мобільного доступу до клінічних даних. Одним із найбільш перспективних напрямів цифровізації медичних установ є використання RFID-технологій, які дозволяють автоматизувати процес ідентифікації пацієнтів, зменшити кількість помилок під час роботи з медичними записами та підвищити оперативність взаємодії медичного персоналу з інформаційною системою [1].

У сучасних умовах особливого значення набуває забезпечення швидкого доступу медичного персоналу до інформації про пацієнта без прив'язки до стаціонарного робочого місця. Використання мобільних клієнтських застосунків у поєднанні з RFID-інфраструктурою дозволяє реалізувати більш гнучкі сценарії взаємодії з медичною інформаційною системою та оптимізувати процес обробки клінічних даних [2].

У попередніх дослідженнях було розроблено серверну RFID-систему ідентифікації пацієнтів на базі Flask-платформи з підтримкою REST API та інтеграцією інформаційної моделі медичних записів. Подальшим етапом розвитку системи стало створення мобільного RFID-модуля, орієнтованого на забезпечення мобільного доступу медичного персоналу до функцій ідентифікації пацієнтів та перегляду клінічної інформації.

Метою роботи є розробка функціонального прототипу мобільного RFID-модуля медичної інформаційної системи для підтримки сценаріїв ідентифікації пацієнтів, перегляду медичних записів та навігації між основними функціональними компонентами системи.

Функціональний прототип мобільного застосунку реалізовано для Android-платформи із використанням Java та Material Design-компонентів. Архітектура інтерфейсу побудована за принципом централізованої навігації через головний Dashboard-модуль, який забезпечує доступ до RFID-сканування, історії взаємодій із пацієнтами та модулів перегляду клінічної інформації.

Головний екран мобільного модуля реалізовано у вигляді централізованого Dashboard-інтерфейсу, який забезпечує швидкий доступ до основних сценаріїв взаємодії з системою. Для підвищення зручності використання застосовано карткову структуру інтерфейсу з великими інтерактивними елементами та системою візуального розмежування функціональних модулів.

Основними компонентами мобільного RFID-модуля є:

- модуль RFID-сканування;
- модуль перегляду інформації про пацієнта;
- модуль історії відвідувань;
- модуль візуалізації медичних статусів.

Процес RFID-ідентифікації реалізовано через окремий функціональний екран сканування, який моделює взаємодію мобільного застосунку зі зчитувачем RFID-міток. Після отримання RFID-ідентифікатора система виконує автоматичний перехід до екрану результатів ідентифікації пацієнта, де відображаються основні клінічні дані:

- ПІБ пацієнта;
- RFID ID;
- номер палати;
- медичний статус;
- базова інформація про стан пацієнта.

Для забезпечення зручності сприйняття інформації в інтерфейсі реалізовано систему кольорових статусів пацієнтів, що дозволяє медичному персоналу швидко оцінювати поточний стан пацієнта в умовах обмеженого часу. Використання візуальної ієрархії та Material Design-компонентів забезпечує підвищення ергономічності мобільного застосунку та спрощує навігацію між функціональними модулями [3].

Центральним елементом системи є модуль картки пацієнта, який об'єднує ключову клінічну інформацію, необхідну для оперативної роботи медичного персоналу. У межах функціонального прототипу реалізовано відображення:

- групи крові;
- алергій;
- хронічних захворювань;
- поточних призначень;
- історії взаємодій із пацієнтом.

Загальну логіку взаємодії мобільного RFID-модуля з основними компонентами медичної інформаційної системи наведено на рис. 1.

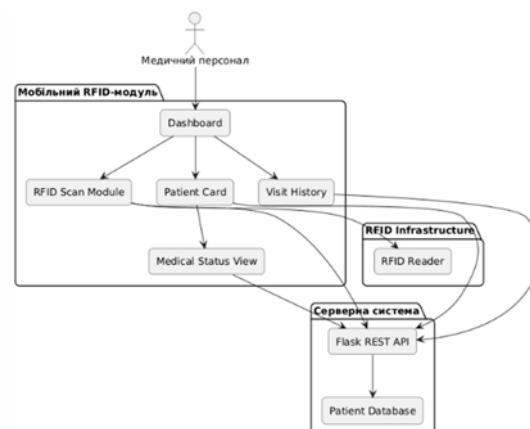


Рис. 1. Схема взаємодії мобільного RFID-модуля з компонентами медичної інформаційної системи

Джерело: сформовано автором

У межах функціонального прототипу також реалізовано модуль перегляду історії взаємодій із пацієнтом, який забезпечує доступ до інформації про попередні відвідування, медичні процедури та призначення. Для представлення даних використано карткову структуру інтерфейсу, що дозволяє уникнути перевантаження екрана великою кількістю текстової інформації та покращує візуальне сприйняття медичних записів.

Інтерфейс мобільного RFID-модуля побудовано відповідно до сучасних принципів UI/UX-проектування мобільних медичних систем. Основну увагу приділено мінімізації кількості дій, необхідних для отримання інформації про пацієнта, а також оптимізації навігації між функціональними компонентами застосунку. Для цього реалізовано централізовану сценарну модель навігації без використання багаторівневих меню та складних структур переходів.

У процесі тестування функціонального прототипу було змодельовано типові сценарії роботи медичного персоналу:

- RFID-ідентифікація пацієнта;
- перегляд медичних записів;
- перевірка історії відвідувань;

- обробка помилок RFID-сканування;
- навігація між функціональними модулями системи.

Результати тестування продемонстрували стабільність роботи інтерфейсного модуля та коректність реалізації основних сценаріїв взаємодії користувача із системою. Використання мобільного RFID-модуля дозволяє скоротити час доступу до інформації про пацієнта та підвищити оперативність виконання базових клінічних операцій.

Приклади реалізованих екранів функціонального прототипу мобільного RFID-модуля, зокрема Dashboard-інтерфейсу, екрана RFID-сканування та картки пацієнта, представлено на рис. 2.

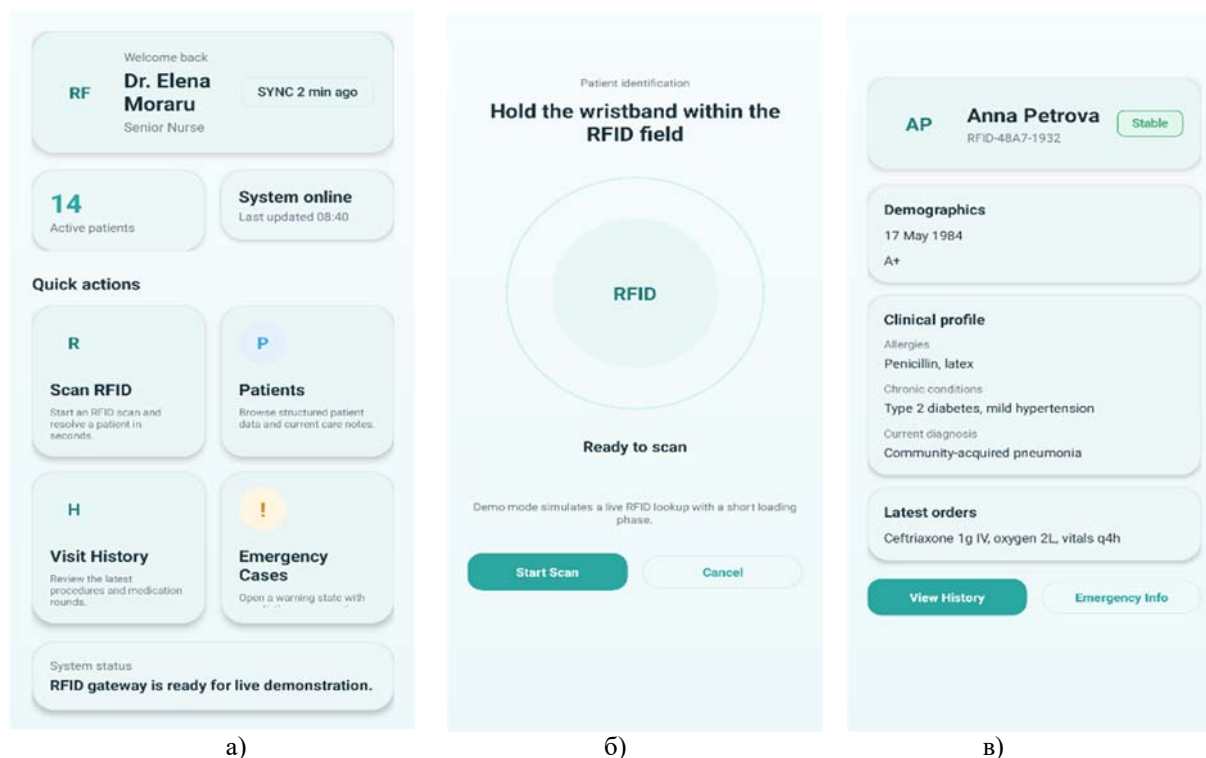


Рис. 2. Інтерфейс функціонального прототипу мобільного RFID-модуля: а) головний Dashboard-екран; б) RFID-сканування; в) картка пацієнта
Джерело: сформовано автором

Отримані результати підтверджують перспективність використання мобільних RFID-рішень у структурі сучасних медичних інформаційних систем. Розроблений функціональний прототип може бути використаний як основа для подальшої інтеграції мобільного клієнта із серверною RFID-платформою, реалізації синхронізації з REST API та підтримки повноцінної роботи з клінічними даними в режимі реального часу.

Представлений функціональний прототип мобільного RFID-модуля демонструє можливість ефективної інтеграції технологій автоматичної ідентифікації пацієнтів у мобільне середовище медичних інформаційних систем. Реалізований підхід забезпечує спрощення доступу медичного персоналу до клінічної інформації, покращення навігації між функціональними модулями та підвищення оперативності взаємодії з цифровою інфраструктурою медичного закладу.

У результаті роботи було:

- реалізовано мобільний RFID-модуль для Android-платформи;
- розроблено функціональний Dashboard-інтерфейс;
- впроваджено сценарії RFID-ідентифікації пацієнтів;
- реалізовано модулі перегляду клінічної інформації та історії взаємодій;
- виконано моделювання типових сценаріїв роботи медичного персоналу.

Отримані результати підтверджують доцільність використання мобільних RFID-рішень у системах цифрової медицини та демонструють перспективність подальшого розвитку мобільних компонентів медичних інформаційних платформ.

Перспективами подальших досліджень є інтеграція мобільного RFID-модуля із серверною платформою через REST API, підтримка синхронізації клінічних даних у режимі реального часу, а також розширення функціональності системи шляхом додавання механізмів авторизації, push-сповіщень та підтримки стандартів HL7/FHIR.

References

1. Fosso Wamba, S., Anand, A., & Carter, L. (2013) A literature review of RFID-enabled healthcare applications and issues. *International Journal of Information Management*, 33 (5), (pp. 875-891) [in English].
2. Dridi, A., Sassi, S., Chbeir, R., & Faiz, S. (2020) A flexible semantic integration framework for fully-integrated EHR based on FHIR standard. *Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2020)*, 2, (pp. 684-691) [in English].
3. Gazzarata, R., Almeida, J., Lindsköld, L., Cangioli, G., Gaeta, E., Fico, G., & Chronaki, C.E. (2024) HL7 Fast Healthcare Interoperability Resources (HL7 FHIR) in digital healthcare ecosystems for chronic disease management: Scoping review. *International Journal of Medical Informatics*, 189, Article 105507 [in English].

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.23

Mykyta Smolenskyi,
Ievgen Sidenko,
Yuriy Kondratenko

PROTOTYPING OF A MOBILE RFID MODULE FOR A HEALTHCARE INFORMATION SYSTEM

The paper presents a functional prototype of a mobile RFID module for a healthcare information system developed as a client-side application for interaction between medical staff and a server-based patient identification platform. The mobile interface for RFID-based patient identification, medical record visualization, and navigation between clinical scenarios was implemented. The proposed approach provides rapid access to patient information and simplifies interaction with the digital infrastructure of healthcare institutions. The functional prototype supports RFID scanning scenarios, patient card visualization, visit history management, and medical status representation. The obtained results demonstrate the potential of integrating mobile RFID solutions into modern healthcare information systems.

Key words: RFID, mobile module, healthcare information system, Android, patient identification, digital healthcare, UI/UX.

Відомості про автора / Information about the Author

Микита Смоленський, аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: nikitasmolenskyi@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-3071-4350>.

Mykyta Smolenskyi, PhD student of the Intelligent Information Systems Department at the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: nikitasmolenskyi@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-3071-4350>.

Євген Сіденко, канд. техн. наук, завідувач кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ievgen.sidenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6496-2469>.

Ievgen Sidenko, PhD, Head of the Intelligent Information Systems Department at the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ievgen.sidenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6496-2469>.

Юрій Кондратенко, д-р техн. наук, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: yuriy.kondratenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7736-883X>.

Yuriy Kondratenko, Doctor of Science, Professor of the Intelligent Information Systems Department at the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yuriy.kondratenko@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7736-883X>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.24

Іван Сова,
Олексій Козлов

ТРАНСФЕР-НАВЧАННЯ ДЛЯ RF-ІДЕНТИФІКАЦІЇ БПЛА: АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ДОМЕН-АДАПТАЦІЇ

Тези присвячено аналізу проблеми деградації ефективності моделей радіочастотного машинного навчання при зміні умов збору даних. Розглянуто таксономію трансферного навчання для RF-застосунків, методи домен-адаптації та їхні обмеження у задачах ідентифікації безпілотних літальних апаратів. Систематизовано відмінності між RF-доменом та комп'ютерним зором з позиції перенесення навченої поведінки. Окреслено перспективні напрями, зокрема самокероване передтренування та домен-рандомізацію.

Ключові слова: БПЛА, радіочастотне машинне навчання, трансфер-навчання, домен-адаптація, ідентифікація, RF-відбиток.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали невід'ємним елементом як цивільного, так і військового простору, що породжує об'єктивну потребу в надійних пасивних системах їхньої ідентифікації. Радіочастотний (RF) підхід є технічно перспективним: кожен БПЛА, підтримуючи зв'язок з оператором, неминуче випромінює сигнали, які несуть у собі апаратно-специфічні особливості – так звані RF-відбитки. Саме на аналізі цих відбитків і базується ціла низка методів ідентифікації [1,2].

Методи радіочастотного машинного навчання (RFML) дозволяють автоматично витягувати інформативні ознаки з «сирих» I/Q -даних та навчати класифікатори розрізняти типи або окремі екземпляри БПЛА. Однак у реальних умовах ці моделі стикаються з фундаментальним обмеженням: поведінка, засвоєна під час навчання, погано переноситься на нові умови розгортання. Зміна позиції антени, апаратури приймача, частотного каналу чи рівня завад призводить до значного падіння точності класифікації. Зазначена проблема, відома як домен-зміщення (domain shift), є ключовою перешкодою на шляху практичного застосування RFML-систем [3].

Формалізація проблеми доменного зміщення

У загальноприйнятій нотації [4] домен визначається як пара $\mathcal{D} = \{X, P(X)\}$, де X – простір вхідних даних, а $P(X)$ – маргінальний розподіл. Задача задається умовним розподілом $\mathcal{T} = \{Y, P(Y|X)\}$, де Y – простір міток. Трансфер-навчання оперує поняттями вихідного та цільового доменів $\mathcal{D}_S$ і $\mathcal{D}_T$ та відповідних задач $\mathcal{T}_S$, $\mathcal{T}_T$: метою є покращення ефективності на $(\mathcal{D}_T, \mathcal{T}_T)$ за рахунок знань, здобутих на $(\mathcal{D}_S, \mathcal{T}_S)$.

Для стандартного навчання з учителем передбачається $\mathcal{D}_S = \mathcal{D}_T$. В RF-контексті ця умова практично ніколи не виконується: апаратні відхилення, нелінійності підсилювачів, IQ-дисбаланс та ефекти поширення сигналу гарантують, що $P(X_S) \neq P(X_T)$, навіть за незначних фізичних змін у системі. Варто зазначити, що переміщення приймальної антени навіть на 30–50 сантиметрів у середовищі з рефлексіями здатне суттєво змінити спектральний профіль прийнятого сигналу і цілком знецінити раніше навчену модель.

Прийнятий сигнал у дискретному часі записується у вигляді:

$$s[t] = \alpha_{\Delta}[t] \cdot \alpha[t] \cdot e^{j(\omega[t] + \theta[t])} \cdot e^{j(\omega_{\Delta}[t] + \theta_{\Delta}[t])} + v[t], \quad (1)$$

де $\alpha[t]$, $\omega[t]$, $\theta[t]$ – амплітуда, частота і фаза корисного сигналу відповідно; параметри з індексом Δ відображають апаратні відхилення передавача/приймача; $v[t]$ – канална завада [3]. Зміна будь-якого з параметрів α_{Δ} , ω_{Δ} , θ_{Δ} або статистичних характеристик $v[t]$ утворює новий домен, до якого стара модель може виявитися нездатною.

Відношення сигнал/шум визначається як:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{t=0}^{N-1} |s[t] - v[t]|^2}{\sum_{t=0}^{N-1} |v[t]|^2} \right), \quad (2)$$

де N – довжина вибірки у відліках [3]. Ця метрика відіграє ключову роль при аналізі домен-адаптації: переходить між рівнями SNR є одним із найбільш досліджених сценаріїв доменного зміщення в RFML.

Таксономія RF-трансферу

Дослідження [5] пропонує спеціалізовану таксономію трансфер-навчання для RF-застосунків, що враховує специфіку апаратних і середовищних факторів. Відповідно до неї виокремлюються три типи домен-адаптації, систематизовані у табл. 1.

Таблиця 1.

Типи домен-адаптації у задачах RF-ідентифікації БПЛА

Тип адаптації	Змінні параметри	Фіксовані параметри	Приклад для БПЛА
До середовища	$v[t], \alpha[t]$	$\alpha_{\Delta}, \omega_{\Delta}, \theta_{\Delta}$	Перенесення моделі з відкритого поля до міського середовища
До апаратури	$\alpha_{\Delta}, \omega_{\Delta}, \theta_{\Delta}$	$v[t], \alpha[t]$	Зміна пари приймач/передавач за незмінних умов каналу
Сумісна	$v[t], \alpha[t], \alpha_{\Delta}, \omega_{\Delta}, \theta_{\Delta}$	-	Трансфер між наземною станцією керування та бортовим приймачем БПЛА

Джерело: сформоване автором на основі [5]

Адаптація до середовища стосується ситуацій, коли апаратура залишається постійною, проте змінюється характер каналу: інший тип завад, багатопромисловість, відмінні кліматичні умови. Прикладом слугує перенесення моделі, навченої у безлюдному полі, до міського середовища з інтенсивним мультипасом. Формально це відповідає зміні $v[t]$ та/або $\alpha[t]$ при незмінних апаратних параметрах $\alpha_{\Delta}, \omega_{\Delta}, \theta_{\Delta}$.

Адаптація до апаратури усуває відхилення, пов'язані зі зміною самого обладнання: іншої пари передавач/приймач, відмінного діапазону несучої частоти f_c чи налаштувань підсилювача. У роботі [3] на реальних даних зафіксовано зниження точності до 7% при прямому перенесенні між парами приймач/передавач навіть однакових моделей – за незмінних умов каналу. Це різко контрастує з поведінкою комп'ютерного зору, де зміна камери при збереженні роздільної здатності практично не впливає на продуктивність.

Сумісна адаптація до середовища та апаратури є найскладнішим сценарієм, що поєднує обидва джерела варіацій. Практично це відповідає задачі трансферу між наземною станцією і самим БПЛА: одночасно відрізняються і канал ($v[t], \alpha[t]$), і апаратура ($\alpha_{\Delta}, \omega_{\Delta}, \theta_{\Delta}$).

Негативний трансфер у RF-задачах

Окремої уваги заслуговує явище негативного трансферу – ситуація, коли використання попередньо навченої моделі не покращує, а погіршує точність на цільовому домені порівняно з навчанням з нуля на обмеженому обсязі цільових даних. У RF-контексті це явище має виражену асиметрію: перенесення від складнішого домену до простішого є здебільшого безпечним, тоді як зворотний напрямок несе суттєвий ризик.

Емпіричні результати [3] демонструють цю закономірність кількісно. При адаптації між доменами з різними рівнями SNR перенесення від моделі, навченої при низьких значеннях SNR $\in [-10$ дБ, -5 дБ], на домен з SNR $\in [15$ дБ, 20 дБ] стабільно дає позитивний ефект. Натомість зворотне перенесення – від чистих умов до зашумлених – нерідко призводить до деградації точності відносно базової лінії. Це пояснюється тим, що модель, навчена на високих SNR, фіксує ознаки, специфічні для умов з малим рівнем завад $v[t]$, які є нерелевантними або навіть шкідливими при класифікації в зашумленому середовищі.

Аналогічна асиметрія спостерігається при адаптації до апаратури: перенесення між носійними частотами f_c у межах одного діапазону є стабільнішим, ніж між різними частотними діапазонами, де апаратні характеристики $\alpha_{\Delta}, \omega_{\Delta}, \theta_{\Delta}$ можуть кардинально відрізнитися. Таким чином, при проектуванні RF-систем ідентифікації БПЛА вибір вихідного домену є не менш критичним рішенням, ніж вибір архітектури моделі чи методу трансферу.

Методи та їхні практичні обмеження

Серед найпоширеніших практичних підходів до RF-трансферу – дотренування голови (head retraining) та тонке налаштування (fine-tuning). Перший заморожує всі шари мережі, крім вихідного, і є обчислювально дешевшим (табл. 2). Однак дотренування голови не завжди забезпечує достатню гнучкість при значних зміщеннях.

Таблиця 2.

Порівняння обчислювальних характеристик методів трансфер-навчання

Метод	Архітектура	Кількість тренуваних параметрів	Потреба в цільових даних	Ефективність при значному ΔSNR
Дотренування голови	CNN	1 518	Мала	Помірна
Дотренування голови	CLDNN	5 911	Мала	Помірна
Тонке налаштування	CNN	7 434 243	Середня	Висока
Тонке налаштування	CLDNN	796 093	Середня	Висока

Джерело: сформоване автором на основі [3]

Виміри на синтетичних та реальних даних [3] показали, що тонке налаштування переважає дотренування голови за умов значного зміщення домену. У ситуаціях, коли $\mathcal{D}_S$ і $\mathcal{D}_T$ близькі – наприклад, $|\text{SNR}_S - \text{SNR}_T| < 5$ дБ – різниця між методами нівелюється. Встановлено також, що ефект трансферу суттєво залежить від відносної складності вихідної та цільової задач: перенесення від складнішого домену (нижче SNR) до простішого (вище SNR) дає більш передбачуваний і стабільний вииграш, ніж у зворотному напрямку, – через ризик негативного трансферу.

Окремі уваги заслуговують підходи змагальної адаптації доменів [6], що реалізують примусову інваріантність ознак до домену через мінімізацію дивергенції між розподілами $P(X_S)$ та $P(X_T)$ у просторі прихованих представлень. Попри теоретичну обґрунтованість, у задачах RF-ідентифікації БПЛА вони показують помірні результати і вимагають одночасного доступу до даних обох доменів, що не завжди реалістично [5].

Специфіка RF-домену порівняно з комп'ютерним зором

У комп'ютерному зорі зміна обладнання збору за умови збереження роздільної здатності практично не впливає на якість перенесення. Натомість в RF-задачах навіть незначна відмінність у апаратурі приймача між двома вимірами однакової сцени вже призводить до статистично значущого зміщення $P(X)$. Причина – в більшій інформаційній ролі дрібних апаратних відхилень: параметри α_Δ , ω_Δ , θ_Δ самі є носіями RF-відбитку конкретного пристрою, і саме вони стають «шумом» при переносі між платформами [5].

Ця асиметрія означає, що методологічні знахідки з комп'ютерного зору чи обробки природної мови не транспонуються автоматично на RF-задачі: потрібні підходи, що явно враховують фізичний механізм формування сигналу згідно з виразом (1) і структуру апаратних завод.

Висновки

Трансфер-навчання є перспективним інструментом для подолання нестабільності RFML-моделей при зміні умов збору сигналів БПЛА, проте його застосування у RF-задачах суттєво складніше, ніж у суміжних областях. Ключова причина – апаратно-залежний характер RF-відбитку, що перетворює зміну обладнання на джерело статистично значущого доменного зміщення $P(X_S) \neq P(X_T)$. Систематичний аналіз [3] підтверджує, що ефективність трансферу залежить не лише від близькості доменів, але й від відносної складності вихідної та цільової задач – фактора, що часто ігнорується у практичних імплементаціях.

Проведений аналіз дозволяє сформулювати ряд практичних рекомендацій. По-перше, при виборі між дотренуванням голови та тонким налаштуванням слід керуватися величиною очікуваного зміщення: за $|\text{SNR}_S - \text{SNR}_T| < 5$ дБ різниця між методами є несуттєвою, тоді як при значних зміщеннях перевагу варто надавати тонкому налаштуванню. По-друге, формування вихідного домену має відбуватися з урахуванням відносної складності задач: навчання на складніших умовах (нижчий SNR, ширший діапазон частотних зміщень ω_Δ) забезпечує стабільніший і передбачуваніший ефект трансферу на простіші цільові домени. По-третє, у задачах ідентифікації БПЛА, де апаратні параметри α_Δ , ω_Δ , θ_Δ є одночасно і носіями RF-відбитку, і джерелом доменного зміщення, підходи змагальної адаптації потребують особливої обережності – надмірне вирівнювання розподілів $P(X_S)$ та $P(X_T)$ ризикує знищити саме ту апаратно-специфічну інформацію, яка уможливило ідентифікацію.

Перспективними напрямками подальших досліджень є самокероване передтренування на RF-даних без розмітки, домен-рандомізація параметрів $\alpha_{\Delta}, \omega_{\Delta}, \theta_{\Delta}$ синтетичного сигналу для підвищення реалістичності навчальних даних, а також розробка метрик передбачуваності ефекту трансферу до його виконання – зокрема на основі відстаней між розподілами у просторі прихованих представлень мережі.

References

1. Al-Sa'd M.F., Al-Ali A., Mohamed A., Khattab T., Erbad A. RF-Based Drone Detection and Identification Using Deep Learning Approaches: An Initiative towards a Large Open Source Drone Database. *Future Generation Computer Systems*. 2019. Vol. 100. P. 86–97. DOI: 10.1016/j.future.2019.05.007.
2. Tian Y., Wen H., Zhou J., Duan Z., Li T. Optimized Radio Frequency Footprint Identification Based on UAV Telemetry Radios. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 16. P. 5099. DOI: 10.3390/s24165099.
3. Wong L.J., Muller B., McPherson S., Michaels A.J. An Analysis of Radio Frequency Transfer Learning Behavior. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2024. Vol. 6, No. 2. P. 1210–1242. DOI: 10.3390/make6020057.
4. S. J. Pan, Q. Yang. A Survey on Transfer Learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2010. Vol. 22, No. 10. P. 1345–1359. DOI: 10.1109/TKDE.2009.191.
5. Wong L.J., Michaels A.J. Transfer Learning for Radio Frequency Machine Learning: A Taxonomy and Survey. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 4. P. 1416. DOI: 10.3390/s22041416.
6. E. Tzeng, J. Hoffman, K. Saenko, T. Darrell. Adversarial Discriminative Domain Adaptation. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*: 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. P. 2962–2971. DOI: 10.1109/CVPR.2017.316.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.24

Ivan Sova,
Oleksiy Kozlov

TRANSFER LEARNING FOR RF-BASED UAV IDENTIFICATION: ANALYSIS OF DOMAIN ADAPTATION CHALLENGES

The theses examine the domain shift problem in radio frequency machine learning (RFML) systems deployed for UAV identification. Transfer learning taxonomy for RF applications is reviewed, covering environment adaptation, platform adaptation, and co-adaptation scenarios. Key distinctions between RF and computer vision domains are discussed from the perspective of knowledge transferability. Practical limitations of fine-tuning and head retraining strategies are analysed, and directions for future research are identified.

Key words: UAV, radio frequency machine learning, transfer learning, domain adaptation, identification, RF fingerprinting.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Іван Сова, аспірант факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: owlano@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8972-4069>.

Ivan Sova, Ph. D. student of the Computer Science Faculty of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: owlano@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8972-4069>.

Олексій Козлов, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: kozlov_ov@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2069-5578>.

Oleksiy Kozlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: kozlov_ov@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2069-5578>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.25

Євгеній Стоєв,
Віктор Раленко

АРХІТЕКТУРНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МАСШТАБОВАНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ПЛАГІНІВ

Сучасні вимоги до програмного забезпечення диктують необхідність створення гнучких платформ, здатних розширювати свій функціонал без перекомпіляції та зупинки ядра системи. У доповіді розглядаються ключові архітектурні патерни та принципи реалізації систем із динамічним завантаженням плагінів. Основний фокус зроблено на ізоляції контекстів, управлінні життєвим циклом залежностей та забезпеченні стабільності базового застосунку.

Ключові слова: ядро, плагіни, ізоляція контекстів, життєвий цикл залежностей, патерни.

Сучасні парадигми інженерії програмного забезпечення зумовлюють необхідність проектування гнучких платформних рішень, здатних до розширення функціональних можливостей без перекомпіляції та переривання роботи базового ядра. У даному дослідженні розглядаються фундаментальні архітектурні закономірності та принципи реалізації масштабованих систем, що базуються на динамічному завантаженні модулів. Головну увагу приділено питанням ізоляції контекстів виконання, управлінню життєвим циклом залежностей та забезпеченню загальної стабільності середовища хост-застосунку.

Фундаментальною основою взаємодії між базовою системою та динамічними розширеннями є парадигма контрактного програмування. Вона передбачає формування спільного абстрактного ядра шляхом дефініції строгих інтерфейсів, інкапсульованих у виділених бібліотеках. При цьому архітектура виключає наявність прямих посилань між плагінами та хост-застосунком, реалізуючи обмін даними виключно через стандартизовані програмні інтерфейси. Така агностичність базової платформи щодо специфічної логіки розширень мінімізує зв'язність коду та дозволяє децентралізувати процес розробки комплексних систем.

Критичним аспектом проектування є логічна та просторова ізоляція контекстів виконання. Використання спеціалізованих механізмів сегрегації пам'яті дозволяє нівелювати проблему конфліктів транзитивних залежностей, коли різні модулі потребують несумісних версій одних і тих самих бібліотек. Крім того, надійна архітектура має підтримувати механізми безпечного вивантаження модулів у процесі виконання (hot unloading). Це вимагає імплементації суворого алгоритму звільнення некерованих об'єктів, відкликання делегатів подій та контролю за збиранням сміття (Garbage Collector) з метою запобігання критичним витокам пам'яті.

Інтеграція динамічних підсистем також вимагає модифікації класичної моделі інверсії управління (Inversion of Control) та механізмів впровадження залежностей. З'являється необхідність у динамічній реєстрації сервісів безпосередньо під час виконання програми. Задля збереження цілісності системи застосовується чітке розмежування областей видимості: глобальні сервіси ядра (наприклад, підсистеми логування чи підключення до баз даних) ізолюються від локальних залежностей конкретного плагіна, запобігаючи неконтрольованій мутації загального графа об'єктів.

Забезпечення відмовостійкості та безпеки середовища виконання (sandboxing) виступає обов'язковою умовою стабільного функціонування платформи. Ядро повинно бути стійким до програмних збоїв у сторонньому коді: виняткові ситуації в ізольованому контексті плагіна не повинні призводити до аварійного завершення роботи всієї системи. Це досягається шляхом обмеження привілеїв доступу та впровадження інструментів телеметрії, які здійснюють безперервний моніторинг споживання обчислювальних ресурсів кожним окремим компонентом для превентивного блокування аномальної активності.

Окремий комплекс проблем пов'язаний з еволюцією структур даних та забезпеченням зворотної сумісності. При модифікації об'єктів передачі даних (DTO) цілісність інформаційного обміну підтримується через використання структурних фасадів та адаптерів. У контексті управління персистентними даними найбільш

ефективним підходом є логічна декомпозиція сховищ даних для кожного розширення, що досягається за допомогою поліморфних схем баз даних або імплементації напівструктурованих моделей збереження інформації.

Реалізація системи динамічного завантаження плагінів вимагає переходу від високорівневих концепцій до конкретних інженерних рішень [3]. Процес побудови такої інфраструктури розбивається на кілька ізольованих етапів, кожен з яких вирішує специфічну проблему інтеграції, безпеки або управління ресурсами.

Першим кроком є фізичне розділення кодової бази на хост-застосунок, плагіни та спільні контракти [1]. Створюється окрема бібліотека (наприклад, App.Contracts), яка не містить жодної бізнес-логіки. Вона включає виключно інтерфейси, абстрактні класи, структури даних (DTO) та загальні еnumератори.

Ключовим елементом цієї бібліотеки є інтерфейс точки входу плагіна, наприклад IPluginStartup. Цей інтерфейс зобов'язує кожен модуль реалізувати методи для конфігурації власних залежностей та ініціалізації [2]. Будь-який плагін компілюється з посиланням на цю бібліотеку контрактів, тоді як хост-застосунок використовує її для розпізнавання та виклику завантажених модулів без знання про їхню внутрішню реалізацію [1, 7].

На рівні платформи необхідно реалізувати завантажувач (Plugin Loader), який фізично читає бінарні файли (наприклад, .dll у .NET або .jar у Java) з файлової системи або зовнішнього сховища. Для забезпечення ізоляції створюється кастомний контекст завантаження [4].

У середовищі .NET це досягається шляхом успадкування від класу AssemblyLoadContext [4]. У цьому кастомному контексті перевизначається метод завантаження залежностей: коли плагін запитує певну бібліотеку, система спочатку перевіряє, чи не є ця бібліотека частиною базового ядра (щоб уникнути дублювання в пам'яті), і лише у разі відсутності — завантажує її з директорії плагіна. Це дозволяє двом різним плагінам використовувати, наприклад, бібліотеку Newtonsoft.Json версії 10 та версії 13 одночасно, не викликаючи конфліктів у глобальному просторі імен (Dependency Hell) [1, 4].

Щоб уникнути ситуації, коли плагін випадково або навмисно перезаписує критичні сервіси ядра (наприклад, підміняє глобальний сервіс авторизації), використовується механізм дочірніх контейнерів (Child Containers) [2]. Хост створює ізольовану область (Scope) для Dependency Injection специфічного плагіна. Метод конфігурації плагіна отримує доступ лише до цього дочірнього контейнера. Під час виконання, якщо плагін запитує сервіс, система спочатку шукає його в локальному контейнері плагіна, і якщо не знаходить — делегує запит до глобального контейнера хоста [2, 3].

Оскільки плагіни не мають прямих посилань один на одного, їхня комунікація будується на подієво-орієнтованій архітектурі (Event-Driven Architecture) [6]. Для цього в ядро інтегрується внутрішньопроцесний брокер повідомлень (наприклад, патерн Mediator через бібліотеку MediatR).

Коли один плагін виконує певну дію, він публікує подію у форматі простого об'єкта даних (наприклад, OrderCreatedEvent) у загальну шину повідомлень. Інші плагіни, які підписані на цей тип подій, отримують її асинхронно і виконують власну бізнес-логіку. Цей підхід гарантує нульову зв'язність: плагін-відправник нічого не знає про існування плагінів-одержувачів, що дозволяє додавати або видаляти модулі "на льоту" без порушення ланцюгів виконання [6, 7].

Процес вивантаження є найбільш критичним інженерним викликом. Щоб Garbage Collector зміг звільнити пам'ять, зайняту плагіном, хост-застосунок повинен знищити абсолютно всі жорсткі посилання на об'єкти цього модуля [5]. Це вимагає від архітектури примусового скасування всіх підписок на події (відписки від Event Bus), завершення всіх фонових потоків (через передачу CancellationToken), звільнення дочірнього IoC-контейнера та, зрештою, виклику методу Unload() для самого контексту завантаження [4]. Якщо хоча б один об'єкт ядра утримує посилання на клас плагіна, відбудеться витік пам'яті (Memory Leak), і файл збірки залишиться заблокованим в операційній системі [5].

Забезпечення надійності систем із динамічним життєвим циклом плагінів вимагає впровадження спеціалізованих багаторівневих стратегій тестування, які виходять за межі традиційного модульного та інтеграційного аналізу. Складність верифікації таких платформ безпосередньо зумовлена необхідністю контролювати стан пам'яті, ізоляцію залежностей та коректність контрактної взаємодії в умовах змінного середовища виконання (runtime). Процес тестування має гарантувати стабільність ядра системи незалежно від якості коду завантажуваних розширень.

Фундаментальним етапом є ізольоване модульне тестування плагінів та спільних контрактів. Оскільки архітектура базується на строгому розділенні ядра та бізнес-логіки розширень, кожен плагін підлягає автономній верифікації з використанням імітаційних об'єктів (mock-об'єктів) для загальносистемних сервісів та брокера повідомлень. Це дозволяє довести, що модуль коректно реагує на визначені події, імплементує інтерфейс точки входу та генерує відповідні контракти даних без необхідності ініціалізації всього базового застосунку. На цьому ж рівні перевіряється зворотна сумісність DTO за допомогою методів тестування контрактів (Consumer-Driven Contracts).

На етапі інтеграційного тестування фокус зміщується на верифікацію механізмів фізичного завантаження збірок та коректності роботи контейнера інверсії управління (IoC). Важливим завданням є автоматизована перевірка локалізації залежностей у дочірніх контейнерах. Інтеграційні тести програмно імітують процес підключення плагіна та валідують, що специфічні сервіси розширення не ін'єктуються у глобальну область видимості (Global Scope). Крім того, перевіряється здатність завантажувача коректно розв'язувати конфлікти версій бібліотек, надаючи плагіну його власні версії залежностей через ізольований контекст завантаження, не порушуючи роботу ядра.

Найбільш критичним для даної архітектури є тестування управління життєвим циклом та верифікація відсутності витоків пам'яті під час гарячого вивантаження модулів (Hot Unloading). Для автоматизації цього складного процесу застосовується концепція слабких посилань (Weak References) на об'єкт ізольованого контексту. Сценарій автоматизованого тесту ініціює повний цикл: завантаження плагіна, виконання транзакції, ініціацію процедури деактивації та примусовий виклик збирача сміття (Garbage Collector). Тест вважається пройденим лише тоді, коли слабе посилання стає недійсним (dead reference). Це математично доводить відсутність жорстких посилань, гарантує повне звільнення оперативної пам'яті та підтверджує коректність знищення всіх локальних підписок на глобальні події.

Додатковим рівнем верифікації є тестування відмовостійкості та надійності бар'єрів ізоляції (Sandboxing) із застосуванням елементів хаос-інженерії. У контрольованому середовищі програмно генеруються критичні збої всередині плагіна: штучне перевищення лімітів споживання процесорного часу, переповнення пам'яті (Out of Memory) або генерація необроблених винятків у фонових потоках плагіна. Метою цих випробувань є доведення того, що глобальні механізми перехоплення помилок хост-застосунку здатні ізолювати збійний контекст, безпечно термінувати його роботу та продовжити функціонування інших підсистем без деградації загальної продуктивності платформи.

Підсумовуючи, варто зазначити, що проектування програмних комплексів на основі динамічного завантаження розширень є завданням, яке вимагає знаходження оптимального балансу між гнучкістю архітектури та складністю її підтримки. Дотримання принципів контрактної взаємодії, жорсткої ізоляції контекстів виконання та безпечного управління життєвим циклом об'єктів створює надійне підґрунтя для розробки високо масштабованих інформаційних систем, здатних до безперервної адаптації в умовах змінних вимог.

References

1. Мартін, Р. К. Чиста архітектура: мистецтво розробки програмного забезпечення. Фабула, 2018, с. 182-196.
2. Seemann, M., & van Deursen, S. Dependency Injection Principles, Practices, and Patterns. Manning Publications, 2019, pp. 245-278.
3. Bass, L., Clements, P., & Kazman, R. Software Architecture in Practice. Addison-Wesley Professional, 2021, pp. 122-140.
4. Microsoft. Understanding AssemblyLoadContext. Офіційна документація .NET, 2024.
5. Піхтер, Дж. CLR via C#. Програмування на платформі Microsoft.NET Framework. Пітер, 2013, с. 560-595.
6. Фаулер, М. Patterns of Enterprise Application Architecture. Addison-Wesley, 2002, pp. 315-330.
7. Newman, S. Monolith to Microservices: Evolutionary Patterns to Transform Your Monolith. O'Reilly Media, 2019, pp. 88-112.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.25

Yevhenii Stoiev,
Viktor Ralenko

ARCHITECTURAL PRINCIPLES OF BUILDING SCALABLE SYSTEMS BASED ON DYNAMIC PLUGIN LOADING

Modern software requirements dictate the need to create flexible platforms capable of extending their functionality without recompiling or halting the system core. This paper examines the key architectural patterns and principles for implementing systems with dynamic plugin loading. The main focus is placed on context isolation, dependency lifecycle management, and ensuring the stability of the base application.

Key words: core, plugins, context isolation, dependency lifecycle, patterns.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Євгеній Стоєв, викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: stoiev.yevhenii@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8999-2267>.

Yevhenii Stoiev, Lecturer of the Software Engineering Department of the Computer Science Faculty of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: stoiev.yevhenii@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8999-2267>

Віктор Раленко, викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ralenko.v@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0009-4161-8468>.

Viktor Ralenko, Lecturer of the Software Engineering Department of the Computer Science Faculty of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ralenko.v@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0009-4161-8468>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.26

Анастасія Темна,
Євгеній Стоєв

ОПТИМІЗАЦІЯ АРХІТЕКТУРИ МАСШТАБОВАНИХ ВЕБЗАСТОСУНКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПІДХОДУ MICRO-FRONTENDS

У тезах досліджується актуальна проблема масштабування великих корпоративних вебзастосунків та розглядаються критичні обмеження традиційної монолітної архітектури клієнтської частини. Проаналізовано парадигму мікро-фронтендів (Micro-frontends) як ефективне архітектурне рішення для декомпозиції складних інтерфейсів на незалежні модулі, які можуть розроблятися, тестуватися та розгортатися автономними крос-функціональними командами. Досліджено ключові методи інтеграції мікро-застосунків, з особливим фокусом на сучасну технологію Webpack Module Federation та її вплив на продуктивність. За допомогою порівняльного аналізу оцінено вплив впровадження мікро-фронтендів на оптимізацію процесів безперервної інтеграції та розгортання (CI/CD), швидкість збирання проєкту та показники стабільності вебсистеми. На основі зібраних даних виділено основні переваги та архітектурні компроміси (trade-offs). Результати дослідження дозволяють визначити доцільність використання цього підходу залежно від масштабу, організаційної структури та бізнес-потреб конкретного вебпроєкту.

Ключові слова: архітектура вебзастосунків, масштабування, мікро-фронтенди, монолітний фронтенд, продуктивність, безперервна інтеграція, Webpack Module Federation, CI/CD.

Сучасний етап розвитку вебтехнологій характеризується стрімким зростанням складності клієнтських застосунків (Single Page Applications – SPA). Користувачі очікують від вебсистем функціональності на рівні нативних десктопних програм. Це призводить до того, що клієнтська частина коду (фронтенд) розростається до гігантських розмірів. Традиційний підхід, за якого весь фронтенд розробляється як єдина монолітна кодова база, виявляє значні обмеження при масштабуванні проєкту [1].

Зі збільшенням кількості розробників монолітна архітектура стає «пляшковим горлечком»: виникають часті конфлікти при злитті коду (merge conflicts), суттєво зростає час збирання проєкту (build time), а розгортання навіть мінорного оновлення вимагає повного регресійного тестування всієї системи [4].

Проблематика монолітної архітектури фронтенду

Історично склалося так, що архітектура вебзастосунків еволюціонувала від монолітних серверних додатків до мікросервісів на бекенді. Проте фронтенд тривалий час залишався монолітним. Основні проблеми такого підходу включають [2]:

1. **Тісна зв'язність коду:** Зміни в одному модулі можуть непередбачувано вплинути на інші частини застосунку.

2. **Технологічна стагнація:** Моноліт прив'язаний до одного фреймворку (наприклад, застарілої версії Angular або React). Оновлення технологічного стеку вимагає переписування всього застосунку, що є економічно недоцільним для бізнесу.

3. **Обмеження CI/CD:** У великих проєктах збирання моноліту може тривати від 20 хвилин до кількох годин, що критично уповільнює процес доставки цінності кінцевому користувачу [1].

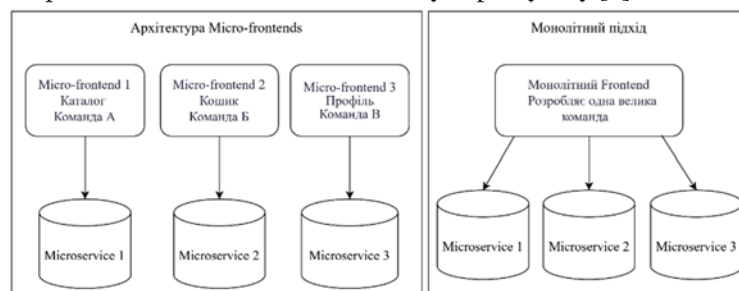


Рис. 1. Еволюція архітектури вебзастосунків: від моноліту до мікро-фронтендів.

Концепція мікро-фронтендів та методи їх інтеграції

Для розв'язання вищезгаданих проблем спільнота інженерів адаптувала бекенд-патерн мікросервісів для клієнтської частини, створивши концепцію мікро-фронтендів (Micro-frontends). Цей підхід передбачає розбиття єдиного вебінтерфейсу на ізольовані, функціонально незалежні фрагменти (наприклад, навігаційне меню, каталог товарів, кошик), кожен з яких розробляється та підтримується окремою командою [4]. Існують різні методи реалізації цієї архітектури, які порівняно у Таблиці 1.

Таблиця 1.

Аналіз методів інтеграції мікро-фронтендів [2, 4]

Метод інтеграції	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
Iframe	Вбудовування застосунків через HTML-тег <iframe>.	Абсолютна ізоляція CSS та JavaScript. Найпростіша реалізація.	Поганий UX, складнощі з маршрутизацією (routing) та передачею даних.
Web Components	Використання нативних Custom Elements для створення інкапсульованих віджетів.	Стандарт браузера, не залежить від фреймворків. Інкапсуляція через Shadow DOM.	Складність управління загальним станом (state management) та серверним рендерингом.
Build-time integration	Кожен мікро-фронтенд публікується як npm-пакет, а потім збирається в єдиний бандл.	Чудова оптимізація коду, єдиний бандл для браузера.	Втрачається незалежність розгортання: оновлення вимагає перезбирання контейнера.
Runtime integration (Module Federation)	Динамічне завантаження коду модулів у браузері під час виконання програми.	Незалежні релізи, спільне використання залежностей без їх дублювання.	Складність налаштування Webpack, вищий поріг входження.

Революційним рішенням на сучасному етапі стала поява плагіна Module Federation, інтегрованого у Webpack 5. Він дозволяє JavaScript-застосункам динамічно експортувати та імпортувати код під час виконання програми (runtime), що забезпечує безшовну інтеграцію модулів без необхідності їхнього фізичного об'єднання на етапі збирання [3].

Практичне порівняння та аналіз продуктивності

Для оцінки ефективності підходів доцільно розглянути порівняльні характеристики монолітної архітектури та архітектури на базі мікро-фронтендів у контексті масштабування розробки.

Таблиця 2.

Порівняння характеристик архітектурних підходів при масштабуванні [1, 5].

Характеристика	Монолітний фронтенд	Мікро-фронтенди (Module Federation)
Швидкість локального запуску	Низька (запускається весь проєкт)	Висока (розробник запускає лише свій модуль)
Масштабованість команд	Обмежена (високий ризик конфліктів)	Висока (команди працюють автономно)
Технологічний стек	Єдиний для всього проєкту	Можливість використання різних технологій
Складність інфраструктури	Низька (один pipeline для розгортання)	Висока (багато репозиторіїв та pipeline-ів)

Проведене дослідження інтеграції незалежних модулів демонструє низку суттєвих переваг. По-перше, значно пришвидшується цикл безперервної інтеграції (CI/CD), оскільки оновлення одного мікро-застосунку розгортається незалежно і миттєво стає доступним у головному додатку-контейнері [3]. По-друге, забезпечується технологічна гнучкість: у разі необхідності плавної міграції продукту на новий фреймворк, це можна робити поступово.

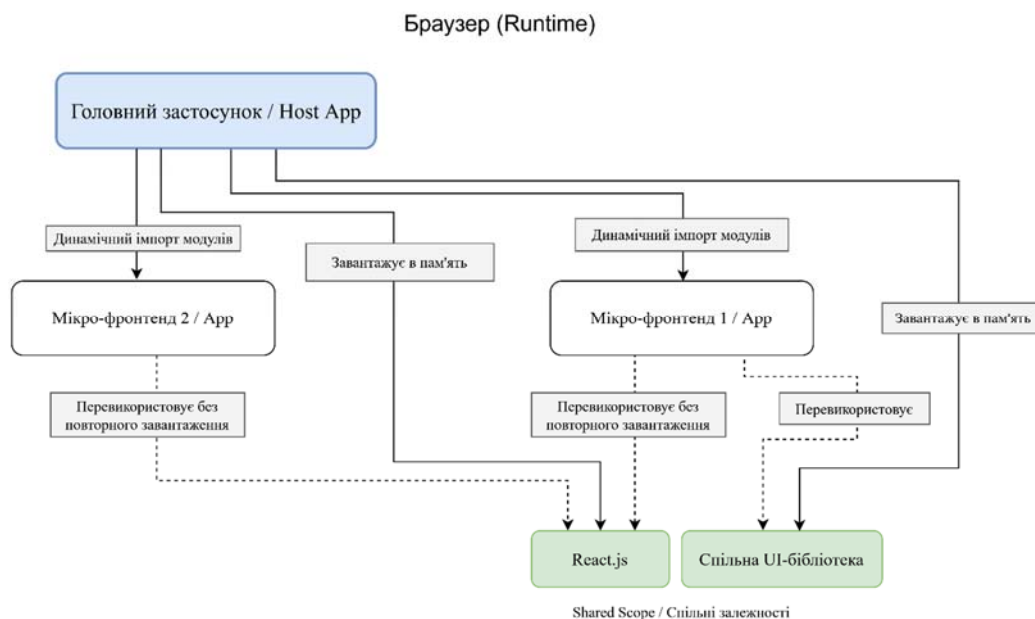


Рис. 2. Схема розподілу та перевикористання залежностей за допомогою Webpack Module Federation.

Ризики та архітектурні компроміси (Trade-offs)

Незважаючи на очевидні переваги, підхід Micro-frontends не позбавлений недоліків, які інженери називають архітектурними компромісами [5]. Найбільшим викликом є ускладнення загальної інфраструктури, маршрутизації та організації локальної розробки (Dev Experience).

Крім того, існує ризик деградації продуктивності вебсторінки [5]. Якщо різні команди використовують різні версії бібліотек або навіть різні фреймворки, користувач змушений завантажувати сотні кілобайт зайвого JavaScript-коду. Це безпосередньо впливає на погіршення метрик Core Web Vitals, зокрема показників First Contentful Paint (FCP) та Largest Contentful Paint (LCP).

Ще однією вагомою проблемою є управління глобальним станом (Global State Management). У моноліті використання інструментів на кшталт Redux або Vuex є стандартизованим. У мікро-фронтендах застосунки повинні бути максимально ізольованими, тому комунікація між ними вимагає побудови надійних каналів через Custom Events у браузері [4].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що використання мікро-фронтендів не є універсальним рішенням (silver bullet) для будь-якого проекту. Цей підхід вирішує в першу чергу організаційні проблеми, а не технічні [1, 2].

Архітектура Micro-frontends є життєво необхідною для великих Enterprise-проектів із розподіленими командами розробників (понад 20-30 інженерів на фронтенді), де пріоритетом є незалежність розгортання, масштабованість організаційної структури та ізоляція помилок. Водночас для невеликих проектів, стартапів або команд з єдиним контекстом витрати на налаштування інфраструктури мікро-фронтендів значно перевищуватимуть потенційні вигоди [5].

References

1. Geers M. Micro Frontends in Action. Shelter Island: Manning Publications, 2020. 256 p.
2. Mezzalana L. Building Micro-Frontends: Scaling Teams and Projects Empowering Developers. Sebastopol: O'Reilly Media, 2021. 308 p.
3. Jackson Z., Herrington J. Practical Module Federation. [S. l.]: Independently published, 2021. 130 p.
4. Smith A. Micro Frontends as a Strategy for Incremental Legacy Modernization. International Journal for Multidisciplinary Research. 2026. Vol. 8, iss. 2. P. 12–25. DOI: <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2026.v08i02.78065>.
5. Davis R. Micro-Frontend Architecture: A Comparative Study of Startups and Large Established Companies. IEEE Conference Publication. 2025. P. 45–52. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11030972/>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.26

Anastasiia Temna,
Yevhenii Stoiev

OPTIMIZATION OF SCALABLE WEB APPLICATIONS ARCHITECTURE USING THE MICRO-FRONTENDS APPROACH

These theses explore the pressing issue of scaling large enterprise web applications and examine the critical limitations of traditional monolithic client-side architecture. The micro-frontend paradigm is analysed as an effective architectural solution for decomposing complex interfaces into independent modules that can be developed, tested and deployed by autonomous cross-functional teams. Key methods for integrating micro-applications are investigated, with a particular focus on the modern Webpack Module Federation technology and its impact on performance. Through comparative analysis, the impact of implementing micro-frontends on the optimisation of continuous integration and deployment (CI/CD) processes, project build speed, and web system stability metrics has been assessed. Based on the collected data, the main advantages and architectural trade-offs have been identified. The research findings enable the feasibility of using this approach to be determined depending on the scale, organisational structure and business needs of a specific web project.

Keywords: web application architecture, scaling, micro-frontends, monolithic frontend, performance, continuous integration, Webpack Module Federation, CI/CD.

Відомості про авторів / Information about the Author

Анастасія Темна, студентка факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: anastasiitemna@gmail.com.

Anastasiia Temna, student at the Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Ukrainian. E-mail: anastasiitemna@gmail.com.

Євгеній Стоєв, викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: stoiev.yevhenii@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8999-2267>.

Yevhenii Stoiev, Lecturer of the Software Engineering Department of the Computer Science Faculty of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: stoiev.yevhenii@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8999-2267>.

© А. Темна, Є. Стоєв

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.27

Eduard Lysenkov

PERCOLATION EFFECTS IN NANOCOMPOSITES BASED ON POLYLACTIC ACID AND CARBON NANOTUBES

Percolation effects in nanocomposites based on polylactic acid (PLA) and carbon nanotubes (CNTs) were investigated. The influence of CNT concentration on the formation of conductive networks, dielectric behavior, and mechanical properties of PLA/CNT systems was analyzed. It was shown that increasing CNT content leads to the formation of a fractal-like percolation structure responsible for anomalous electrical conductivity and changes in relaxation processes. Near the percolation threshold, a sharp increase in electrophysical characteristics and nonlinear changes in mechanical properties were observed.

Key words: polylactic acid, carbon nanotubes, polymer nanocomposites, percolation, electrical conductivity, fractal structure, dielectric properties.

Polymer nanocomposites filled with carbon nanostructures are considered promising functional materials due to their ability to combine low density, mechanical flexibility, and tunable electrophysical properties. Among biodegradable polymers, polylactic acid (PLA) attracts considerable attention because of its environmental compatibility, biocompatibility, and applicability in additive manufacturing, biomedical engineering, and flexible electronics. However, the relatively low electrical conductivity and brittleness of pure PLA significantly limit its practical applications in advanced functional systems.

The incorporation of carbon nanotubes (CNTs) into a polymer matrix is an effective approach for improving the electrical, mechanical, and dielectric properties of polymer materials. Owing to their high aspect ratio, electrical conductivity, and mechanical strength, CNTs are capable of forming conductive networks inside the polymer matrix even at low filler concentrations. The formation of such interconnected structures is associated with percolation processes, where the system undergoes a transition from an insulating to a conductive state after reaching a critical filler concentration.

The electrophysical properties of PLA/CNT nanocomposites are strongly governed not only by the CNT concentration but also by the morphology and topology of conductive clusters formed in the material [1]. Near the percolation threshold, the conductive network acquires fractal-like features that significantly influence charge transport mechanisms, dielectric relaxation, and interfacial polarization processes. In disordered systems of this type, anomalous electrical behavior may arise due to tunneling transport, hopping conductivity, and correlated charge carrier motion.

In addition to electrical phenomena, the formation of a percolation network affects the mechanical behavior of nanocomposites. Depending on the dispersion quality and cluster structure, CNT agglomerates may either initiate stress concentration or reinforce the polymer matrix through efficient load transfer mechanisms.

Therefore, investigation of percolation effects in PLA/CNT nanocomposites is important for understanding the relationship between microstructure formation and functional properties of polymer nanocomposites [2]. The aim of this work is to study the influence of CNT concentration on the formation of percolation structures and their effect on the electrical and mechanical properties of PLA-based nanocomposites.

Polylactic acid produced by Devil Design (Poland) was used as the polymer matrix. Before processing, the polymer was dried at 80 °C for 4 h in order to remove residual moisture. Multiwalled carbon nanotubes synthesized by chemical vapor deposition were used as conductive nanofillers. The content of mineral impurities in CNTs did not exceed 0.1 %.

PLA/CNT nanocomposites were prepared by ultrasonic dispersion in solution. The polymer was dissolved in a mixed solvent of dimethyl sulfoxide and dimethylacetamide with a volume ratio of 1:1 to obtain a 10 wt.% polymer solution. CNT concentration varied in the range from 0.1 to 1.5 wt.%. Ultrasonic treatment was performed using a UZDN-A650 ultrasonic disperser at a frequency of 22 kHz and power of 300 W for 5 min. After sonication, the obtained mixture was cast onto a glass substrate and dried at 80–100 °C until complete solvent removal.

The microstructure of PLA/CNT systems was studied using optical microscopy. The fractal characteristics of conductive clusters were analyzed from binary micrographs using ImageJ software. The fractal dimension was determined by the box-counting method.

Electrical conductivity measurements were carried out in a wide frequency range using impedance spectroscopy. The obtained frequency dependences were analyzed within the framework of the Jonscher power law. Mechanical properties of nanocomposites were investigated under uniaxial tensile loading using a Shimadzu AGS-10kNX testing machine at a crosshead speed of 50 mm/min.

The properties of PLA/CNT nanocomposites are strongly determined by the formation of conductive clusters and the development of a percolation network inside the polymer matrix. Due to the high aspect ratio of carbon nanotubes, even a relatively small amount of filler significantly affects the morphology and functional characteristics of the system.

Optical microscopy demonstrated that the spatial distribution of CNTs changes considerably with increasing filler concentration. At low CNT contents (0.1–0.25 wt.%), isolated conductive aggregates were formed inside the PLA matrix. These clusters were separated from each other and therefore could not provide effective charge transport through the material. Near the concentration range of 0.5–0.75 wt.%, the distance between conductive clusters decreased and interconnected conductive pathways started to form. At higher CNT concentrations (1.0–1.5 wt.%), a developed conductive network with a branched topology was observed.

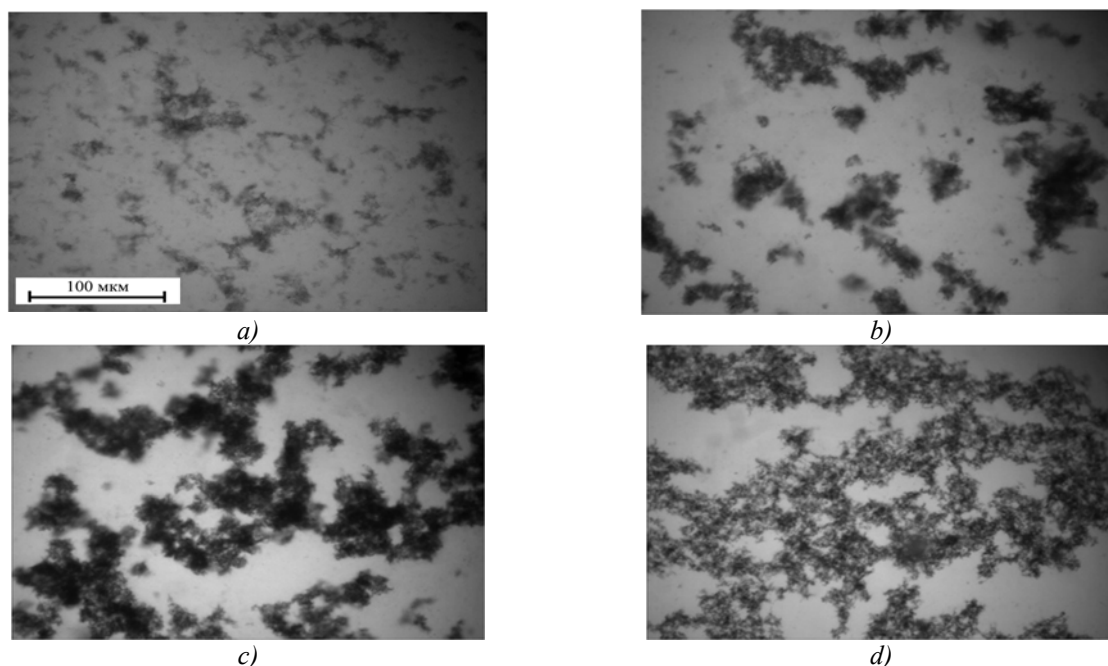


Fig. 1. Microphotographs of the system based on polylactic acid and carbon nanotubes at a magnification of $\times 100$.
Nanotube content: a) 0.1%; b) 0.25%; c) 0.75%; d) 1.0%.

Fractal analysis revealed that the fractal dimension of conductive clusters increased with CNT concentration. At low filler contents, the fractal dimension remained relatively small, corresponding to isolated and weakly connected structures. Near the percolation threshold, a rapid increase in fractal dimension was observed, indicating the formation of a complex interconnected conductive network. At higher CNT concentrations, the fractal dimension approached saturation, which may be associated with the formation of a dense conductive structure occupying a significant volume of the polymer matrix [2].

The obtained results indicate that the percolation transition in PLA/CNT systems is governed not only by CNT concentration but also by the topology of conductive pathways formed during filler aggregation. Such fractal-like structures significantly affect charge transport mechanisms and dielectric response of the nanocomposites.

Electrical conductivity measurements confirmed the existence of a pronounced percolation transition in the investigated systems [3]. At low CNT concentrations, the conductivity remained close to the conductivity of pure PLA and corresponded to dielectric behavior. However, after reaching the critical CNT concentration, the electrical conductivity increased by several orders of magnitude due to the formation of continuous conductive channels inside the polymer matrix.

The frequency dependences of AC conductivity were analyzed using the Jonscher power law [3]:

$$\sigma(\omega) = \sigma_{DC} + \sigma_{AC} = \sigma_{DC} + A\omega^n$$

Analysis of experimental data demonstrated that the exponent n exceeded unity for several CNT concentrations. Such behavior cannot be explained within the framework of classical hopping conductivity models and indicates the presence of anomalous charge transport mechanisms [3, 4]. The observed effect may be associated with tunneling transport between CNT clusters, interfacial polarization processes, and correlated motion of charge carriers in fractal conductive networks.

Mechanical investigations also demonstrated the influence of percolation phenomena on the macroscopic behavior of PLA/CNT nanocomposites. At low CNT concentrations, agglomerates acted as stress concentrators and initiated microcrack formation, resulting in deterioration of tensile properties. After the formation of a connected CNT network, the efficiency of stress transfer between the polymer matrix and conductive filler increased, leading to partial reinforcement of the material [5].

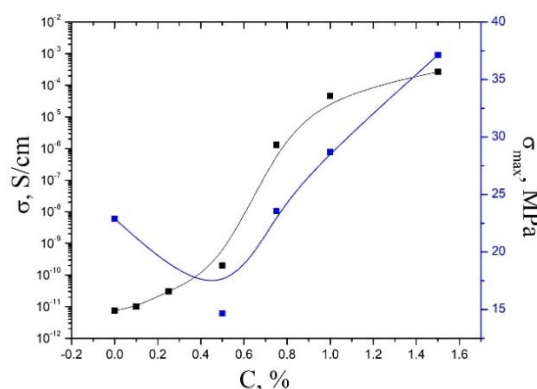


Fig. 2. Concentration dependences of electrical conductivity and tensile strength for PLA/CNT nanocomposites.

The obtained results demonstrate that the formation of a fractal-like percolation structure is the key factor controlling the electrophysical and mechanical properties of PLA/CNT nanocomposites [4, 5]. The observed anomalous conductivity behavior near the percolation threshold indicates the important role of structural disorder and topology of conductive networks in determining the functional characteristics of polymer nanocomposites.

Percolation effects in PLA/CNT nanocomposites were investigated depending on the concentration of carbon nanotubes. It was established that increasing CNT content leads to the formation of a fractal-like conductive network inside the polymer matrix. Near the percolation threshold, a sharp increase in electrical conductivity and significant changes in the morphology of conductive clusters were observed.

Fractal analysis demonstrated that the complexity and connectivity of conductive structures increase with CNT concentration. The obtained frequency dependences of electrical conductivity revealed anomalous charge transport behavior associated with tunneling effects and correlated charge carrier motion in disordered conductive networks.

Mechanical investigations showed that the formation of the percolation structure also affects the tensile properties of nanocomposites. The obtained results indicate that the topology of CNT conductive networks plays a key role in controlling the electrophysical and mechanical properties of PLA/CNT systems.

References

1. Varela, J.Y.D., Jurado, L.G.B., Olivas-Armendáriz, I. et al. (2024) The role of multi-walled carbon nanotubes in enhancing the hydrolysis and thermal stability of PLA. *Scientific Reports*, 14, (pp. 8405).
2. Lysenkov, E.A., Demchenko, V.L., & Lazarenko, M.M. (2025) Structure-properties relationship in polymer nanocomposites based on polylactic acid and carbon nanotubes. *Functional Materials*, 32(3), (pp. 397–404).
3. Lysenkov, E.A., Bilyi, S.A., Nesin, S.D., & Klepko, V.V. (2025) Dielectric properties and relaxation processes in nanocomposites based on polylactic acid and carbon nanotubes. *Ukrainian Journal of Physics*, 70(12), (pp. 860–866).
4. Lysenkov, E.A. (2025) Percolation behavior of electrical conductivity of polylactic acid-based nanocomposites. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 17(3), (pp. 03032).
5. Lysenkov, E.A., Sytnyk, I.O., Lysenkova, I.P. et al. (2025) Microstructure and mechanical properties of polymer nanocomposites based on polylactic acid and carbon nanotubes. *Materials Science*, 61, (pp. 628–635).

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.27

Едуард Лисенков

**ПЕРКОЛЯЦІЙНІ ЕФЕКТИ В НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВІ ПОЛІМОЛОЧНОЇ КИСЛОТИ ТА
ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК**

Досліджено ефекти перколяції в нанокompозитах на основі полімолочної кислоти (ПМК) та вуглецевих нанотрубок (ВНТ). Проаналізовано вплив концентрації ВНТ на формування провідних мереж, діелектричну поведінку та механічні властивості систем ПМК/ВНТ. Показано, що збільшення вмісту ВНТ призводить до формування фрактоподібної перколяційної структури, що відповідає за аномальну електропровідність та зміни в процесах релаксації. Поблизу порогу перколяції спостерігалось різке збільшення електрофізичних характеристик та нелінійні зміни механічних властивостей.

Ключові слова: полімолочна кислота, вуглецеві нанотрубки, полімерні нанокompозити, перколяція, електропровідність, фрактальна структура, діелектричні властивості.

Відомості про автора / Information about the Author

Едуард Лисенков, д. фіз.мат. наук, професор кафедри фізики та математики факультету комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: ealysenkov@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1369-4609>.

Eduard Lysenkov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Physics and Mathematics, Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: ealysenkov@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1369-4609>.

© Е. Лисенков

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.28

Bohdan Somriakov,
Svitlana Borovlova

BIG DATA PROCESSING OPTIMIZATION USING APACHE SPARK DISTRIBUTED COMPUTING

The abstract presents the Apache Spark architecture as a primary tool for large-scale data processing (Big Data). The research is based on distributed computing principles, where a Driver coordinates cluster operations via a Directed Acyclic Graph (DAG). Particular attention is given to partitioning and caching mechanisms, which allow executors to process dataset segments in parallel.

The results confirm the effectiveness of lazy evaluation for optimizing performance and minimizing memory overhead. The proposed configuration approach via spark-submit has the potential for use in analytics, machine learning, and highly scalable systems.

Keywords: Apache Spark, PySpark, Big Data, Distributed Computing, DAG, Caching, Partitioning, Scalability.

PySpark is the Python API for Apache Spark, an open-source framework designed for large-scale data processing and analytics. It enables developers and data scientists to work with big data using Python, while leveraging the speed and distributed computing capabilities of Spark.

In traditional data processing systems, handling massive datasets can be slow and inefficient, especially when computations are performed on a single machine. PySpark solves this problem by distributing data and computations across multiple nodes in a cluster, allowing parallel processing.

This makes it high suitable for big data applications such as machine learning, real-time data streaming, and large-scale data transformation, where execution is internally represented as a Directed Acyclic Graph (DAG) to optimize and organize the sequence of operations efficiently (fig. 1).

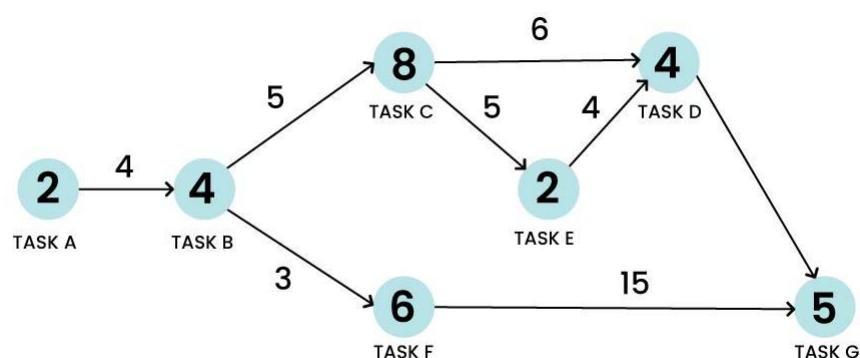


Fig. 1. – Directed Acyclic Graph (DAG) example [1]

The provided code initializes a Spark session and defines a simple dataset with names and ages to create a DataFrame. It then applies two transformations: a filter to include only individuals older than 20 and a withColumn operation to add 10 to those ages. Because Spark uses lazy evaluation, these operations are not executed until the final show() action is called, which triggers the actual data processing and displays the results.

```
spark = SparkSession.builder.appName("DAG Example").getOrCreate()
data = [("Alice", 20), ("Bob", 25), ("Charlie", 30)]
columns = ["Name", "Age"]
df = spark.createDataFrame(data, columns)

df_filtered = df.filter(df.Age > 20)
df_mapped = df_filtered.withColumn("AgePlus10", df_filtered.Age + 10)
df_mapped.show()
```

The logical execution plan and data lineage for this process is depicted in the fig. 2. Each node represents a specific data state – from the initial orange DataFrame through the teal and yellow transformation stages – while the arrows indicate the dependencies between them.



Fig. 2. – Directed Acyclic Graph (DAG) corresponding to the code

When `show()` is called, the Driver coordinates the execution by telling the Workers to start grabbing "chunks" or partitions of the data from the disk. This is the moment the Executors – the actual software processes running on those workers – spring into action to perform the work.

The process is depicted in the fig 3. Each Executor loads one chunk into its allocated RAM, filters the rows, and adds the new column. Once that specific task is finished, the Executor clears that RAM to make room for the next chunk.

Because partitions are distributed across multiple Executors simultaneously, the cluster can process different parts of the file at the exact same time. This parallel approach ensures that the computer never has to hold the entire file in its memory at once, allowing even a single machine to handle datasets that are much larger than its own physical RAM.

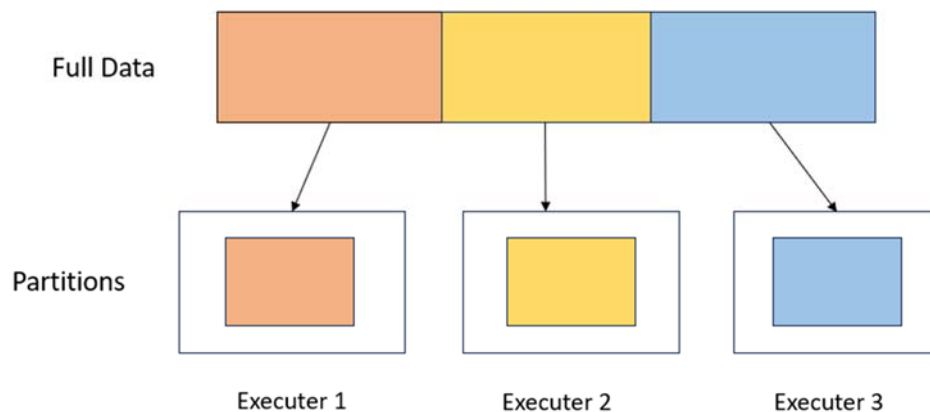


Fig. 3. – Data partitioning [2]

A cluster is a collection of multiple computers, known as Nodes, that are connected via a high-speed network to work together as a single, powerful unit. In the context of the Apache Spark architecture, the cluster provides the physical and virtual infrastructure needed to run the Driver and Executors (fig. 4). Instead of relying on one massive, expensive supercomputer, a cluster allows for "scaling out" by adding more standard machines to increase the total available CPU and RAM.

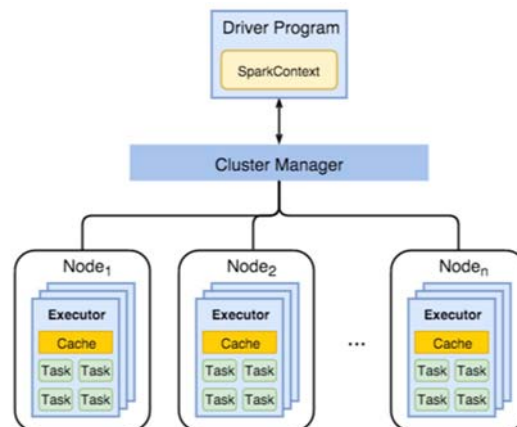


Fig. 4 – Key Spark objects [3]

Resources for a Spark application can also be specified using the `spark-submit` command, which informs the Cluster Manager exactly how to "carve out" physical resources from the Nodes (PCs). This configuration allows the Driver to divide data into partitions and run 20 tasks simultaneously.

```
spark-submit \
  --master yarn \
  --num-executors 10 \
  --executor-memory 4G \
  --executor-cores 2 \
  script.py
```

Caching is a technique used to store a DataFrame in the RAM of the Executors so it doesn't have to be recomputed from scratch every time it is used.

```
df_important = df.filter(col("Age") > 20).cache()
df_important.count()
df_important.show()
```

The `.cache()` command tells the Executors to store the filtered rows in their RAM immediately after the first action, like `count()`, is triggered. Consequently, when `show()` is called later, the Driver skips the original data source and the filter logic entirely.

In conclusion, the Spark architecture functions as a distributed master-slave system where a central Driver acts as the "brain," converting code into a logical execution map called a DAG. This Driver coordinates with a Cluster Manager to allocate resources across a Cluster of physical Nodes (PCs), which host software processes known as Executors.

To process data efficiently without overloading RAM, the dataset is divided into smaller partitions; when an Action like `show()` is triggered, the Driver assigns these partitions as individual Tasks to the Executors.

Each Executor uses its available CPU cores to process multiple tasks in parallel, loading only the necessary data chunks into memory to perform transformations before clearing the space for the next set of tasks.

References

1. Apache Spark architecture. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/dsa/introduction-to-directed-acyclic-graph/>. (date of request 09.05.2025).
2. Optimizing Query Performance in PySpark with Partitioning, Bucketing, and Z-Ordering.. URL: <https://medium.com/@shilpajoshi1635/optimizing-query-performance-in-pyspark-with-partitioning-bucketing-and-z-ordering-a5e215e6c272> (date of request 09.05.2025).
3. Configure Apache Spark settings URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/hdinsight/spark/apache-spark-settings>. (date of request 09.05.2025).

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.28

Богдан Сомряков,
Світлана Боровльова

ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРОБКИ BIG DATA ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЕНЬ АРАСНЕ SPARK

У тезі представлено архітектуру Apache Spark як інструменту для обробки великих масивів даних (Big Data). Дослідження базується на принципах розподілених обчислень, де Driver координує роботу кластера через орієнтований ациклічний граф (DAG). Особливу увагу приділено механізмам партиціювання та кешування, що дозволяють есекуторам обробляти частини датасету паралельно.

Результати підтверджують ефективність лінійних обчислень для оптимізації швидкодії та мінімізації навантаження на пам'ять. Запропонований підхід до конфігурації через spark-submit має потенціал для використання в аналітиці, машинному навчанні та масштабованих системах.

Ключові слова: Apache Spark, PySpark, Big Data, Розподілені обчислення, DAG, Кешування, Партиціювання, Масштабованість.

Відомості про автора / Information about the Author

Богдан Сомряков, студент факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, Миколаїв, Україна. E-mail: somriakov.bohdan@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0003-7045-8586>

Bohdan Somriakov, student of the Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: somriakov.bohdan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7045-8586>

Світлана Боровльова, ст. викладачка кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили, Миколаїв, Україна. E-mail: svetlana.borovlyova@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1994-0556>.

Svitlana Borovlova, Senior Lecturer at the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: svetlana.borovlyova@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1994-0556>

© Б. Сомряков, С. Боровльова

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.29

Tetyana Sorokina

THE IMPORTANCE OF HIGH-QUALITY VERIFICATION OF CONCRETE-REINFORCEMENT BOND IN CIVIL ENGINEERING

This article examines the importance of high-quality verification of the concrete–reinforcement bond in civil engineering. Particular attention is given to the influence of bond performance on the structural reliability, load-bearing capacity, durability, and long-term safety of reinforced concrete structures. The study highlights modern verification methods, experimental approaches, and analytical techniques used to evaluate bond behavior under various loading and environmental conditions. The findings emphasize that accurate assessment of the concrete–reinforcement interaction is essential for improving structural performance, preventing premature failures, and ensuring compliance with contemporary engineering standards. Furthermore, the research investigates the impact of material properties, reinforcement geometry, and concrete composition on bond efficiency. Special consideration is given to the role of advanced testing technologies in enhancing the precision of bond verification procedures. The article also discusses the significance of numerical modeling and simulation techniques in predicting the behavior of reinforced concrete elements. In addition, the study outlines the challenges associated with bond deterioration caused by environmental and mechanical factors. The results demonstrate that comprehensive bond verification contributes to the development of safer, more sustainable, and economically efficient civil engineering structures.

Key words: civil engineering structures, concrete elements, verification procedures, testing technologies.

The bond between concrete and reinforcing steel is a fundamental mechanism governing the structural behavior and performance of reinforced concrete elements. In civil engineering practice, the effectiveness of this bond directly affects load transfer, crack control, stiffness, and overall durability of structures. As reinforced concrete remains one of the most widely used construction materials in modern infrastructure, ensuring a reliable and high-quality concrete–reinforcement interaction is of paramount importance for structural safety and long-term serviceability. The concrete–reinforcement bond is a complex phenomenon influenced by multiple factors, including the mechanical properties of concrete and steel, surface characteristics of reinforcement bars, concrete mix design, curing conditions, and environmental exposure [1, p. 315]. Ribbed reinforcement bars are designed to enhance mechanical interlock, while chemical adhesion and friction also contribute to bond strength. However, improper construction practices, inadequate compaction, poor-quality materials, or insufficient curing may significantly reduce bond performance. As a result, structures may experience excessive cracking, reinforcement slippage, reduced load-bearing capacity, or even progressive structural failure [2, p. 86]. Environmental factors such as moisture, temperature fluctuations, and chemical exposure can further accelerate the deterioration of the bond between concrete and reinforcement. Therefore, regular inspection and quality control during the construction process are essential for ensuring structural reliability and durability. Modern testing methods allow engineers to assess bond behavior more accurately under both static and dynamic loading conditions. In addition, compliance with established construction standards and design codes helps minimize the risk of bond-related defects. Continuous research in material science and structural engineering also contributes to the development of more durable reinforcement systems and improved concrete compositions.

In civil engineering design, the verification of concrete–rebar bonding is essential at both the theoretical and practical levels. Design codes and standards, such as **Eurocode 2**, **ACI 318**, and **fib Model Code**, provide analytical models and empirical formulas for evaluating bond stress and anchorage length [4, p.140]. Nevertheless, these models often rely on simplified assumptions and conservative safety factors. Therefore, experimental verification remains a critical component of quality assurance in reinforced concrete construction [3, p.194]. Standardized laboratory tests, including pull-out tests, beam-end tests, and tension tests, are widely used to evaluate bond–slip behavior and failure mechanisms under controlled conditions. In recent years, non-destructive testing (NDT) methods have gained increasing importance in assessing the quality of concrete–reinforcement bonding in existing structures. Techniques such as ultrasonic pulse velocity testing, ground-penetrating radar (GPR), and acoustic emission monitoring allow engineers to detect voids, cracks, and

reinforcement positioning without damaging the structure. These methods are particularly valuable for the inspection and maintenance of aging infrastructure, where direct access to reinforcement is limited.

Alongside experimental approaches, numerical modeling and simulation have become indispensable tools in modern civil engineering practice. Advanced finite element software such as *ANSYS*, *ABAQUS*, and *COMSOL Multiphysics* enables detailed modeling of the bond–slip relationship, stress distribution, and crack propagation in reinforced concrete elements. By incorporating nonlinear material models and interface elements, engineers can simulate realistic structural behavior under various loading and environmental conditions [5, p. 391]. Structural analysis software such as *ETABS*, *SAP2000*, and *Autodesk Robot Structural Analysis* further supports the evaluation of reinforced concrete systems at the global structural level, ensuring that local bond behavior is consistently integrated into overall design solutions.

The integration of experimental data with numerical simulations significantly enhances the reliability of structural assessments. Digital tools allow engineers to calibrate models using laboratory results, perform parametric studies, and predict long-term performance under cyclic loading, temperature variations, and chemical exposure [6, p. 380]. Moreover, Building Information Modeling (BIM) platforms facilitate coordinated design, quality control, and documentation throughout the project lifecycle, contributing to improved construction accuracy and reduced risk of errors [Fig.1].

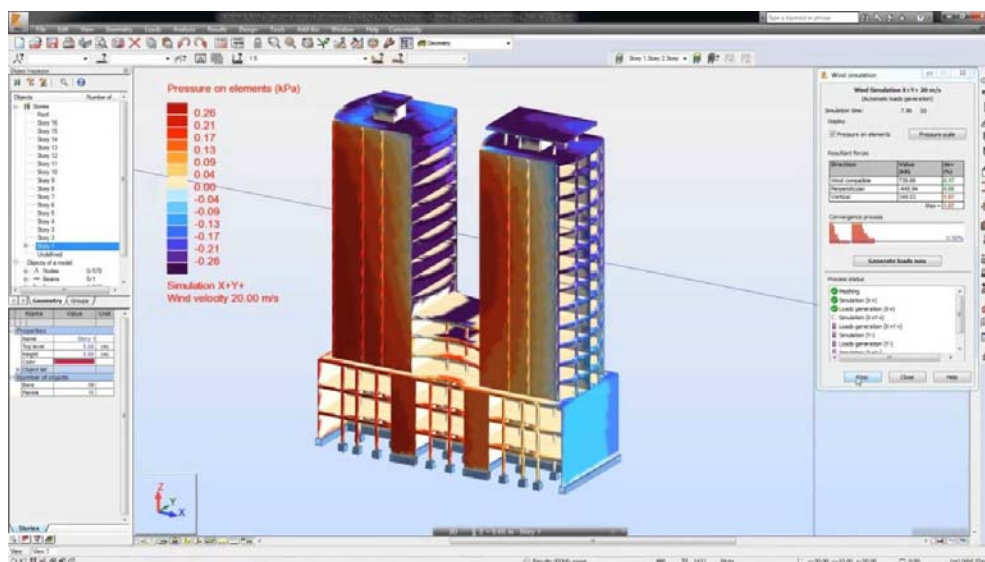


Fig. 1. Autodesk Robot Structural Analysis

In the context of sustainable and resilient construction, high-quality verification of concrete–reinforcement bonding plays a crucial role. Proper bonding improves structural efficiency, reduces material consumption, and extends the service life of structures, thereby lowering maintenance costs and environmental impact. As infrastructure projects become increasingly complex and subject to stricter safety and sustainability requirements, the role of accurate verification methods and advanced software tools continues to grow [7, p. 180]. Modern computational technologies allow engineers to simulate the interaction between concrete and reinforcement with a high degree of precision. These digital tools help identify potential weaknesses in structural elements before construction begins, reducing the likelihood of failure during operation. In addition, reliable bond verification contributes to better load distribution and improved resistance to cracking and deformation. Advanced modeling software also enables optimization of reinforcement layouts, which can decrease unnecessary material usage and support environmentally responsible design practices. Furthermore, the integration of automated analysis systems increases the speed and consistency of engineering assessments. Researchers and practitioners continue to develop innovative methods for evaluating bond behavior under various loading and environmental conditions. As a result, the combination of experimental research and digital verification technologies has become an essential component of modern structural engineering.

In conclusion, the high-quality verification of the bond between concrete and reinforcement is a critical aspect of civil engineering that directly influences structural safety, durability, and performance. A comprehensive approach combining theoretical analysis, experimental testing, non-destructive evaluation, and advanced computational modeling ensures reliable design and construction outcomes. The use of modern engineering software and adherence to international standards further strengthen the effectiveness of verification processes, making them an essential component of contemporary civil infrastructure development.

References

1. ACI Committee 408. (2003). Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension (ACI 408R-03). American Concrete Institute.
2. fib Model Code for Concrete Structures 2010. (2013). International Federation for Structural Concrete (fib). Ernst & Sohn.
3. Nilson, A. H., Darwin, D., & Dolan, C. W. (2010). Design of Concrete Structures (14th ed.). McGraw-Hill Education.
4. Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Concrete. Prentice Hall.
5. Tastani, S. P., & Pantazopoulou, S. J. (2010). Bond of reinforcement in concrete: Mechanical modeling and analytical assessment. Journal of Engineering Mechanics, 136(3), 385–397.
6. Lundgren, K. (2005). Bond between ribbed bars and concrete. Magazine of Concrete Research, 57(7), 371–382.
7. EN 1992-1-1. (2004). Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1. European Committee for Standardization.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.29

Тетяна Сорокіна

ВАЖЛИВІСТЬ ВИСОКОЯКІСНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ ЗЧЕПЛЕННЯ БЕТОНУ З АРМАТУРОЮ В ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ

У статті розглядається важливість високоякісної верифікації зчеплення бетону з арматурою у цивільному будівництві. Особливу увагу приділено впливу характеристик зчеплення на конструктивну надійність, несучу здатність, довговічність і довготривалу безпеку залізобетонних конструкцій. Дослідження висвітлює сучасні методи верифікації, експериментальні підходи та аналітичні методики, що використовуються для оцінювання поведінки зчеплення за різних навантажувальних і експлуатаційних умов. Отримані результати підкреслюють, що точне оцінювання взаємодії бетону й арматури є необхідним для підвищення ефективності конструкцій, запобігання передчасним руйнуванням і забезпечення відповідності сучасним інженерним стандартам.

Крім того, у дослідженні проаналізовано вплив властивостей матеріалів, геометрії арматури та складу бетону на ефективність зчеплення. Особливу увагу приділено ролі сучасних технологій випробувань у підвищенні точності процедур верифікації зчеплення. У статті також розглядається значення чисельного моделювання та методів симуляції для прогнозування поведінки залізобетонних елементів. Додатково окреслено проблеми, пов'язані з погіршенням характеристик зчеплення внаслідок впливу навколишнього середовища та механічних факторів. Результати дослідження демонструють, що комплексна верифікація зчеплення сприяє створенню безпечніших, більш сталих та економічно ефективних будівельних конструкцій.

Ключові слова: будівельні конструкції, бетонні елементи, процедури верифікації, технології випробувань.

Відомості про автора / Information about the Author

Тетяна Сорокіна, кандидат технічних наук, доцент кафедри англійської мови для технічних та агробіологічних спеціальностей Національного університету біоресурсів та природокористування, м. Київ, Україна. E-mail: super_tan-sorokina@ukr.net, orcid: <http://orcid.org/0000-0002-8174-3716>

Sorokina Tetyana, Ph.D. in Technical Sciences, Associate professor of the Department of English for technical and agrobiological specialties National University of Life and environmental science of Ukraine, Kyiv, orcid: <http://orcid.org/0000-0002-8174-3716>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.30

Олена Лазарева

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПАРТИСИПАТИВНОГО ПІДХОДУ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯМ

В тезах представлено особливості застосування партисипативного підходу в системі управління земельними ресурсами. Проаналізовано в історичному аспекті партисипативний підхід. Проаналізовано закордонний досвід партисипативного управління. Досліджено законодавчу та нормативну базу, якою регламентовано застосування партисипативного підходу. В рамках використання підходу партисипації в процесі управління землекористуванням, запропоновані сценарії його застосування. З'ясовано, що запропоновані особливості щодо застосування партисипативного підходу в системі управління земельними ресурсами під час їх використання сприятимуть ефективному управлінню ними, захищаючи в цілому інтереси жителів громади.

Ключові слова: партисипативний підхід, партисипативне управління, управління земельними ресурсами, ефективне використання земельних ресурсів, прозорість рішень, залучення місцевих жителів.

В нинішніх умовах необхідним є забезпечення конструктивної взаємодії всіх зацікавлених сторін у процесі ведення ефективного землекористування, що спрямоване на забезпечення синергетичного ефекту від реалізації злагоджених рішень, проєктів тощо.

Таке можливим є за умови застосування партисипативного підходу в системі управління землекористуванням, при якому відносини між керівним персоналом, робітниками та зацікавленими сторонами ґрунтуються на основі партнерства та взаємовигідній співпраці.

Відповідно в процесі нашого дослідження спробуємо і ми обґрунтувати сценарії його застосування в системі управління землекористуванням, вивчивши при цьому закордонний досвід використання партисипативного підходу.

Термін «партисипація» походить від англійського participation «участь» і являє собою взаємодію між групою осіб для створення чогось нового та перспективного, що буде діяти на основі спільних взаємовигідних рішень, сценаріїв та дій задля сприятливого їх використання в майбутньому.

У практичну діяльність партисипативний підхід був впроваджений у середині ХХ століття і передбачав таку норму, що право на управління державою громада реалізує через обраних представників.

Якщо проаналізувати закордонний досвід партисипативного управління, то можна побачити, то можна побачити, що в європейських країнах партисипативне управління представлено моделлю управління територіальними структурами та громадами, де кожен її член бере активну участь у життєдіяльності громади [1]. У 1999 році питання партисипативної демократії розглядалися Ш. Ейценштадтом [2], де акцент йшов на тому, що партисипативна демократія характеризується правлінням саме громадян, а не політиків конкретної держави загалом. Окремі дослідники пропагували свідому політичну участь громадян, зосереджуючись на проблемі розвитку партисипативної форми демократії [3]. Вчений Барбер Б. [4] сформував теоретичні підвалини теорії партисипативного підходу, вказавши, що активність громадян є основним рушієм перетворень. Фанг [5] вважав, що партисипація містить ключовий принцип підзвітної автономії, де публічне управління поєднує стратегії децентралізації та заміщення державних посад.

Що стосується України, то партисипативний підхід активно почав використовуватися з 2000-х років. Так, аспекти партисипативної демократії розглядаються Маруховським О. [6], де він обґрунтовує особливості цієї концепції, наголошуючи на необхідності її впровадження в українське суспільство.

В рамках використання підходу партисипації в процесі управління землекористуванням, спроектуємо сценарії його застосування.

В практиці українських реалій законодавче регулювання партисипативної демократії закріплено в Законі України «Про публічні консультації» [7], в якому визначається порядок організації залучення громадян до формування та реалізації державної політики. Ще одним важливим документом, що спрямований на розвиток партисипативної демократії є Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо народовладдя на рівні місцевого самоврядування» [8], який забезпечує права громадян на безпосередню участь у місцевому самоврядуванні, застосовуючи партисипативний підхід.

Розвиток партисипатизму, а особливо його активне впровадження в практику українських реалій, набув особливого поширення з часу введення воєнного стану з 2022 року, коли почалася активна цифровізація та онлайн-інструменти громадської участі, такі як електронні консультації, портали, урядовий сервіс «Дія» тощо [9, С. 530].

Виходячи із сутності партисипативного підходу, то зазначимо, що в системі управління земельними ресурсами він може бути впроваджений у таких формах, як:

- 1) залучення громади до процесу прийняття рішень у практиці землекористування шляхом проведення систематичних обговорень тих чи інших питань, що мають суттєвий вплив на погодження інтересів громади щодо зміни цільового призначення певної земельної ділянки;
- 2) постійне інформування жителів громади шляхом публічного звітування, оприлюднення певної інформації на інформаційних порталах органів влади стосовно прозорості рішень щодо ведення господарювання та можливостей використання земельних ділянок;
- 3) конструктивна та сконцентрована взаємодія зусиль під час розробки генеральних планів населених пунктів, а також розробки містобудівної документації, проєктів землеустрою, що дозволяє врахувати потреби жителів, а також досягти консенсусу під час виконання цього виду робіт;
- 4) надання можливості жителям громади бути залученим до вирішення таких важливих питань, як використання частини коштів на впорядкування чи то певних земельних ділянок, чи то територій загального користування, що дозволить покращити благоустрій певної території, а також сприятиме прозорому та ефективному використанню коштів на розвиток місцевих ініціатив;
- 5) прийняття вірних і взаємоузгоджених рішень в процесі вирішення спорів між жителями громади та інвесторами щодо ефективного використання земельних ресурсів шляхом всебічного аналізу певної ситуації, і на основі результатів аналізу досягнення взаємовигідних альтернативних підходів, що в цілому сприятиме позитивний вплив на стан землекористування;
- 6) можливе впровадження певних рішень щодо спільного проєктування громадського простору з урахуванням принципу корисності шляхом можливого залучення місцевих жителів або ж архітекторів, які допомагатимуть втілити задуми щодо корисного та ефективного використання певної чи то території, чи то простору;
- 7) комунікаційний зв'язок на всіх рівнях, а також забезпечення обміну зусиллями та ідеями між усіма учасниками, що задіяні у сфері втілення певних конструктивних ідей та рішень, які принесуть користь в цілому;
- 8) налагодження відповідної стратегії та тактики спілкування, що дозволить всебічно враховувати інтереси жителів громади, а також вивчити другорядні аспекти, які не в повній мірі впливатимуть на певну ситуацію щодо стану землекористування або ж можливості його ефективного використання тощо;
- 9) результативність, яка має проявлятися під час досягнення конкретних правильних та корисних змін, що сприятимуть веденню ефективного землекористування та відповідатимуть потребам громади;
- 10) забезпечення сталого та збалансованого використання земельних ресурсів шляхом узгоджених дій та прагнень інтересів громад, що в цілому принесе користь від використання певної земельної ділянки та забезпечить прибутковість ведення господарювання.

Запропоновані вище форми партисипативного підходу в практиці управління земельними ресурсами представлені на рис. 1.

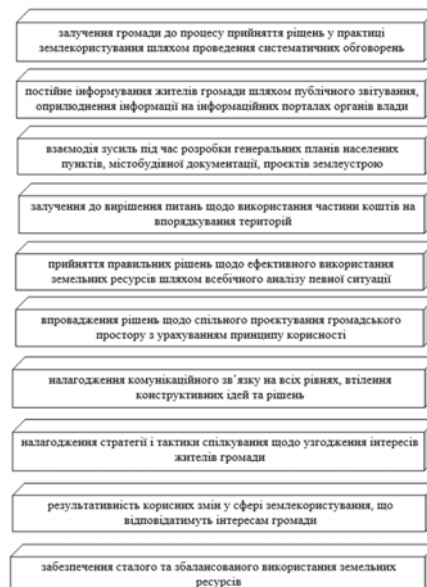


Рис. 1. Можливі форми партисипативного підходу в системі управління земельними ресурсами.
Джерело: власні пропозиції автора

Запропоновані особливості щодо застосування партисипативного підходу в системі управління земельними ресурсами під час їх використання сприятимуть ефективному управлінню ними, захищаючи в цілому інтереси жителів громади.

References

1. Shustrova K., Pavlichenko Ye. (2023). Osnovni zasady stanovlennya ta rozvitku partisipacii [Basic principles of establishment and development of participation]. *Metodologiya teorii i praktiki urisprudencii - Methodology of theory and practice of jurisprudence*, 3, (pp. 15-20). Retrieved from: https://yurvisnyk.in.ua/v3_2023/2.pdf [in Ukrainian].
2. Eisenstadt W. (2002). Paradoks demokratichnyh rejumiv: krihtkist i zmynnist. [The paradox of democratic regimes: fragility and variability]. *Polis – Polis*, 2, (pp. 81-95). [in Ukrainian].
3. Andrychuk T. (2019). Partisipativna ta deliberativna demokratiya v suchasnomu politychnomu diskursy. [Participatory and deliberative democracy in modern political discourse]. *Politichne gittya - Political life*, 1, (45-51). [in Ukrainian].
4. Barber B. (1984). Silna demokratiya: partysypatyvna politika dlya novoy ery. [Strong democracy : participatory politics for a new age]. *University of California Press - University of California Press*, (320 p.). [in Ukrainian].
5. Fung A. (2011). Proekr Partysipaciya: vstup. [The Participedia Project : An Introduction]. *Mignarodny gurnal politichnogo menegmentu - International Journal of Public Management*, vol. 14 (3). (341-3762). [in Ukrainian].
6. Maruhovsky O. (2005). Advantages and disadvantages of the information society. [Perevagy ta vady informaciyного suspilstva]. *Politichny menegment - Political management*. 1, (127-136). Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PoMe_2005_1_16. [in Ukrainian].
7. Pro publichni konsultatsii: Zakon Ukrainy vid 20.06.2024 No 3841-IX [On public consultations: Law of Ukraine dated 20.06.2024 No. 3841-IX]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3841-20#Text> [in Ukrainian].
8. Pro vnesennia zmin do deiakikh zakoniv Ukrainy shchodo narodovladdia na rivni mistsevoho samovriaduvannia: Zakon Ukrainy vid 09.05.2024 No 3703-IX [On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding Democracy at the Level of Local Self-Government: Law of Ukraine of 09.05.2024 No. 3703-IX]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3703-20#Text> [in Ukrainian].
9. Yuvsechko Ya., Koval N. and Hlamazda P. (2025). Partisipativna demokratiya: evolucia pravovih pidhodiv do gromadskoy uchasti [Participatory democracy: the evolution of legal approaches to public participation], vol. 8 (13), pp. 522-536. Retrieved from: <https://perspectives.pp.ua/index.php/niu/article/view/27419/27383> [in Ukrainian].

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.30

Olena Lazareva

FEATURES OF THE APPLICATION OF THE PARTICIPATORY APPROACH IN THE LAND USE MANAGEMENT SYSTEM

The abstracts present the features of the application of the participatory approach in the land resources management system. The participatory approach is analyzed from a historical perspective. Foreign experience of participatory management is analyzed. The legislative and regulatory framework regulating the use of the participatory approach has been studied. Within the framework of the use of the participatory approach in the process of land use management, scenarios for its application have been proposed. It was found that the proposed features of the application of a participatory approach in the land resources management system during their use will contribute to their effective management, generally protecting the interests of community residents.

Key words: participatory approach, participatory management, land management, efficient use of land resources, transparency of decisions, involvement of local residents.

Відомості про автора / Information about the Author

Олена Лазарева, д. екон. наук, професор, професор кафедри управління земельними ресурсами факультету економічних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: lazareva95@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1050-7118>.

Olena Lazareva, Doctor of Economic Sciences, Professor of the Department of Professor, Professor of Department of Land Management of Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: lazareva95@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1050-7118>

© О. Лазарева

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.31

Ігор Перович

ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ПРИБЕРЕЖНИХ ЗАХИСНИХ СМУГ

Визначення на місцевості геометричних параметрів прибережних захисних смуг є важливим елементом охорони земельних ресурсів та водного середовища. Відомо, що для вирішення поставленої мети законодавством передбачено створення навколо водойм прибережних захисних смуг, відліковою лінією встановлення ширини яких є меженний рівень води. Встановлення меженого рівня води є однією із актуальних задач при розробленні проектів землеустрою щодо відведення прибережних захисних смуг. В даному дослідженні запропонована методика встановлення позначки (висоти) меженого рівня води, що в перспективі дозволяє встановити геометричні параметри меж прибережних захисних смуг для будь-якого періоду проведення знімальних топографо-геодезичних робіт водного об'єкту довільної конфігурації.

Ключові слова: *прибережна захисна смуга, меженний рівень, позначка, визначення, методика.*

Відповідно до нормативних документів для встановлення ширини прибережних захисних смуг (ПЗС) відліковою лінією є положення урізу води в меженний період, який спостерігається один раз у двадцять років. При цьому, Земельний та Водний Кодекси України [1,3] чітко регламентують ширину ПЗС окремих видів водних об'єктів. Для малих річок, струмків і потічків, ставків площею до 3 гектарів ширина ПЗС має становити 25 метрів, середніх річок, водосховищ на ставків площею більше 3 гектарів - 50 метрів, великих річок, водосховищ та озер - 100 метрів, уздовж морів та навколо морських заток і лиманів - не менше двох кілометрів. Якщо крутизна схилів водного об'єкту перевищує три градуси, то ширину прибережної захисної смуги подвоюють [2].

При розробленні проектів землеустрою ПЗС та водоохоронних зон необхідна наявність відповідного картографічного матеріалу. Це в свою чергу призводить до необхідності проведення відповідних топографо-геодезичних робіт. З цієї метою в загальній структурі проекту землеустрою повинен бути розроблений проект топографо-геодезичного забезпечення (ПТГЗ) встановлення меж, де повинна бути горизонталь (ізобата) меженого рівня, яка в наступному буде лінією відліку зовнішньої межі ПЗС. Використовуючи наявний картографічний матеріал, на кривій меженого рівня намічають характерні точки (вигини, прогини тощо), планове положення яких фіксують відповідними геодезичними методами. Відповідно до отриманих точок меженого рівня води та нормативних вимог встановлюють зовнішній контур прибережної захисної смуги.

При виконанні топографо-геодезичних робіт на річках, озерах, водосховищах і шельфі вихідною геодезичною основою є планові пункти та репери Державної геодезичної мережі. Згущення опорної мережі виконують прокладанням ходів полігонометрії, засобами GNSS-технологій та лінійно-кутових побудов з позначками, визначеними технічним нівелюванням. Опорна геодезична мережа служить основою виносу проекту в натуру відповідно до розроблених розмічувальних креслень, а також проведенні, при необхідності, топографо-геодезичних, інженерно-гідрологічних та інженерно-гідрографічних робіт. Форма і метод побудови геодезичної мережі залежать від конкретних умов і характеру майбутніх робіт.

Важливим елементом визначення ширини ПЗС в реальних умовах є встановлення системи відліку. Аналіз картографічних та нормативно- правових документів показує, що на топографічних картах масштабів 1:10000, 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000 та топографічних планах масштабів 1:5000 і 1:2000 берегова лінія озер та ставків, а також річок відповідає лінії рівня води в меженний період, а берегова лінія великих водосховищ - лінії нормального підпірного рівня [5], а на топографічних планах масштабів 1:1000 і 1:500 берегові лінії наносять за їхнім положенням на місцевості в момент зйомки [6]. Берегові лінії водосховищ показують по лінії їх нормального підпірного горизонту (НПГ). Таким чином, важливою актуальною задачею є встановлення на місцевості ізобати меженого рівня води при виконанні вишукувальних робіт землеустрою. Розглянемо можливості встановлення лінії меженого рівня водної поверхні, якщо відома його позначка. В цьому випадку, винесення на місцевості точок із заданими позначками H виконують від пунктів висотних геодезичних мереж, застосовуючи методи ГНСС нівелювання, тригонометричного та найчастіше геометричного нівелювання.

На ділянках водного об'єкту висотну мережу створюють у вигляді системи постійних і тимчасових реперів. На річках шириною до 800 м постійні реperi встановлюють на одному березі, а на річках шириною більше 800 м – обох. На плесових ділянках річки, по берегах озер і водосховищ реperi встановлюють через 5-8 км. Як правило, позначки реперів визначають нівелюванням IV класу, а при значному ухилі водної поверхні – нівелюванням III класу. До мережі нівелювання III і IV класів можуть бути включені реperi водомірних постів.

Розглянемо методику встановлення меженного рівня вод (рис.1). Нехай на суходолі знаходиться геодезичний пункт R_p з відомими плановими і висотними координатами. За архівними даними відома позначка меженного рівня у даному водному об'єкті. Встановимо меженний рівень у довільній точці A методом геометричного нівелювання.

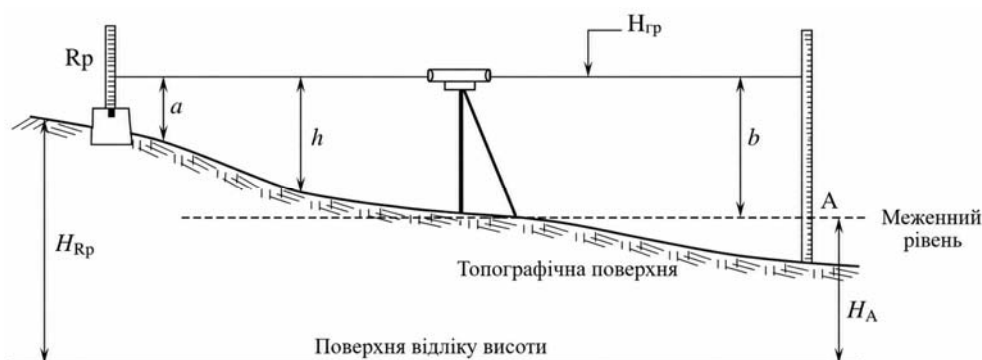


Рис.1 . Винесення меженного рівня води в натуру

При встановленні меженного рівня в точці A на визначену позначку H_A нівелір установлюють між вихідним репером R_p і заданою точкою A . Нівелір приводять у робоче положення. На репері R_p та точці A встановлюють рейки. Попередньо вираховують перевищення між позначками репера та меженного рівня

$$h = H_A - H_{R_p} \quad (1)$$

Беруть відлік a по рейці, встановленій на репері R_p , а потім по рейці в точці A . Встановлену в точці A рейку зміщують у вертикальній площині таким чином, щоб відлік b по рейці у цій точці задовольняв умові

$$h = b - a \quad (2)$$

Відлік b , який повинен бути встановлений по рейці в точці A можна отримати за виразом

$$b = H_{R_p} + a - H_A \quad (3)$$

або

$$b = H_{гп} - H_A \quad (4)$$

де $H_{гп} = H_{R_p} + a$ – горизонт приладу.

Аналогічним чином можна встановити висотне положення меженного рівня водного об'єкту в будь-якій його точці. Точки встановлення меженного рівня вибирають в місцях, які б дозволили чітко окреслити конфігурацію меженного рівня водного об'єкту, а звідси, в перспективі, конфігурацію ПЗС. Усі точки меженного рівня закріплюються тимчасовими знаками на час ведення робіт з встановлення меж ПЗС. Від зафіксованих знаків меженного рівня відкладають значення відстаней, які відповідають нормативним вимогам щодо ширини ПЗС. При цьому, відкладена відстань повинна бути перпендикулярною до дотичної рівневої поверхні, проведеної в точці A . Планова геодезична прив'язка знаків меженного рівня бажана, але не є обов'язковою.

Позначка меженного рівня не має принципового значення при визначенні ПЗС для глибоководних об'єктів, оскільки в цьому випадку змінюється положення рівневої поверхні тільки по висоті, а у плановому відношенні вона є незмінною.

Запропонована методика може знайти практичну реалізацію та є особливо актуальною при встановленні ПЗС на водоймах з динамічною зміною водного дзеркала.

References

1. Water Code of Ukraine: Law of Ukraine (1995). <https://zakon.rada.gov.ua/go/213/95-vr>.
2. VBN (1993). Design, arrangement and operation of water protection zones of reservoirs. Kyiv: Derzhvodhosp of Ukraine
3. Land Code of Ukraine (2001) <https://zakon.rada.gov.ua/go/2768-14>.
4. Methodology for organizing water protection zones of rivers of Ukraine (2004). Kyiv: Orion Publishing House.

5. Basic provisions for creating and updating topographic maps of scales 1:10000, 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000 (1999). Approved by the order of the Main Department of Geodesy, Cartography and Cadastre of Ukraine No. 156 dated 12.31.1999
6. The main provisions of creating topographic plans of scales 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500 (1994). Approved by the order of the Main Department of Geodesy, Cartography and Cadastre of Ukraine No. 3 of 01.24.1994

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.31

Ihor Perovych

DETERMINING THE BOUNDARIES OF COASTAL PROTECTION STRIPS

On-site determination of the geometric parameters of the coastal protection strips is an important element of the protection of land resources and the water environment. It is known that in order to achieve this goal, the legislation provides for the creation of coastal protective strips around reservoirs, the reference line for establishing the width of which is the boundary water level. Establishing the limit water level is one of the urgent tasks in the development of projects for the diversion of coastal protective strips. In theses, a method of setting the mark (height) of the boundary water level is proposed for any period of surveying topographical and geodetic works of a water body of arbitrary configuration.

Key words: coastal protective strip, limit level, mark, project, method

Відомості про автора / Information about the Author

Ігор Перович, д. техн. наук, професор, професор кафедри економічної експертизи та землепорядкування Західноукраїнського національного університету, м. Тернопіль, Україна. E-mail: cadastr@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3265-7088>

Ihor Perovych, Doctor of Technology of Sciences, professor, professor of the Department of Economic Expertise and Land Management of the West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine. E-mail: cadastr@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3265-7088>

© І. Перович

Стаття отримана редакцією 28.05.2026.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.32

Лев Перович

ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ САНІТАРНИХ ЗОН ДЖЕРЕЛ МІНЕРАЛЬНИХ ВОД

Топографо-геодезичне забезпечення формування зон санітарної охорони джерел мінеральних вод є важливою складовою проекту землеустрою у сфері лікування та оздоровлення населення. У зв'язку з цим, коротко представлено розмаїття гідромінерального потенціалу України, його експлуатаційні запаси та сучасний стан використання. Важливою складовою забезпечення якісного стану вод мінеральних джерел є топографо-геодезичне встановлення меж водоохоронних зон на основі гідрогеологічних, топографічних та інших чинників, які формують якісну структуру водного середовища. В тезах структуровано топографо-геодезичне забезпечення зон санітарної охорони в залежності від виду джерел мінеральних вод (підземних, поверхневих). Встановлено, що практичне визначення точності встановлення меж поясів охорони водних джерел потребує додаткових теоретичних досліджень.

Ключові слова: мінеральні води, джерела підземних вод, джерела поверхневих вод, зони санітарної охорони, топографо-геодезичні матеріали

Мінеральні води України – це один з найважливіших природних ресурсів країни.. В Україні налічується 45 курортів загальнодержавного та 13 місцевого значення, понад 400 санаторіїв і пансіонатів, де щорічно проходять лікування понад 600 тис. осіб [5].

Наша країна володіє унікальним гідромінеральним потенціалом. Гідромінеральне розмаїття визначається наявністю таких мінеральних вод, як вуглекислі, сульфідні, радонові, залізисті і миш'яковісті, йодові, бромні та йодо-бромні, борні, крем'яністі, води з підвищеним вмістом органічних речовин та води без специфічних компонентів і властивостей. На території держави розповсюджені лікувальні і лікувально-столові мінеральні води 15 типів із специфічними компонентами та властивостями та 4 типи — без специфічних компонентів і властивостей. Розвідані родовища цілого розмаїття мінеральних вод: 28 вуглекислих, 30 радонових, 20 з підвищеним вмістом органічних речовин (типу Нафтусі), 23 бромних, 12 сульфідних. За лікувальними властивостями найбільшу цінність мають води із специфічними компонентами та властивостями.

Експлуатаційні запаси мінеральних вод розвідані на 348 ділянках 266 родовищ та становлять майже 97000, 00 м³/добу, з них лікувальні та лікувально-столові підземні води - майже 71 000 м³/добу. На даний час середньодобовий видобуток за рік по Україні становить менше 10% від затверджених запасів, а в експлуатації перебувають тільки 172 ділянки (49,4 %) [5].. В Україні наявні унікальні мінеральні лікувальні води «Нафтуса», запаси яких знаходяться в районі Трускавця і поблизу Східниці (Львівська обл.) та у районі Сатанова (Хмельницька обл.). Ці води мають високі лікувальні властивості і за своїми запасами є практично необмежені, що дозволяє розширити можливості санаторно-курортного лікування населення не тільки нашої країни, але й багатьох інших. Найбільше територіальне поширення мають радонові лікувальні води з різноманітним хімічним складом, експлуатаційні запаси яких складають 9808,6 м³/добу, що становить близько 15% від загальної кількості. Однак, на даному етапі використовується лише 9% їх наявних експлуатаційних запасів.

Наявність в Україні широкої гами унікальних мінеральних вод ставить в землеустрої завдання розроблення специфічних проектів гірничого відводу для їх видобутку та проектів встановлення науково - обґрунтованих санітарних зон (ЗСО), які б в процесі експлуатації джерел мінеральних вод сприяли якісному та безпечному використанню природного ресурсу. Через порушення умов формування родовищ мінеральних вод внаслідок техногенного втручання на низці родовищ спостерігаються негативні процеси виснаження і забруднення водоносних горизонтів, втрати унікальних властивостей мінеральних вод у процесі експлуатації родовищ. З метою охорони джерел мінеральних вод від негативного впливу навколишнього середовища, навкруги них встановлюють зони санітарної охорони (ЗСО), які складаються із трьох поясів [1].

Зауважимо, що в практиці розрізняють підземні і поверхневі мінеральні води і в залежності від цього повинні формуватись зміст і структура проектів землеустрою.

Підземні мінеральні води - це природні води, що характеризуються певним і стабільним фізико-хімічним складом, вмістом біологічно активних компонентів та сполук відповідно до кондицій, установлених для кожного родовища, які використовують без додаткового оброблення, яке може вплинути на хімічний склад та мікробіологічні властивості. Мінеральні підземні води за призначенням поділяють на лікувальні, лікувально-столові і природно-столові. Мінеральними лікувальними природними водами називаються води, які завдяки підвищеній концентрації розчинених солей, біологічно активних компонентів і мікроелементів мають лікувальні властивості.

У нашій країні налічується чотири великих гідрогеологічних регіонів – це артезіанські басейни Донецький, Дніпровський, Волино-Подільський, Причорноморський. Донбас, Український щит, Українські Карпати та Кримські гори – це провінції складчастих областей. Унікальні родовища мінеральних підземних вод розташовані в Закарпатській, Львівській, Хмельницькій, Тернопільській та Донецькій областях.

Межі зон санітарної охорони.

Підземні джерела мінеральних вод. Межі першого поясу ЗСО підземних джерел мінеральних вод слід встановлювати від одиночної свердловини на відстані: - для захищених - 30 м; - для недостатньо захищених - 50 м. Для водозабірних споруд, розташованих на території об'єкта, на якій неможливе забруднення ґрунту та підземних вод, а також для водозабірних споруд, розташованих у сприятливих санітарних, топографічних та гідрогеологічних умовах, розмір першого поясу ЗСО допускається зменшувати відповідно до 15 та 25 метрів [2,3].

Межу другого поясу ЗСО підземного джерела водопостачання встановлюють на основі гідродинамічних розрахунків з урахуванням архітектурно-будівельного кліматичного районування та нормативним часовим інтервалом просування мікробного забруднення до місця водозабору.

Межу третього поясу ЗСО підземного джерела визначають часом проходження хімічного забруднення води до водозабірної споруди, який повинен бути більше прийнятого терміну експлуатації водозабірної споруди, але не менше ніж 25 років.

Проект землеустрою щодо формування ЗСО включає низку топографо-геодезичних матеріалів, які різняться в залежності від виду джерела мінеральної води.

- для підземних джерел передбачено наступні топографо-геодезичні матеріали [2]: ситуаційний план із джерелом мінеральних вод (басейни його живлення) в масштабі 1:10000-1:25000;
- межі другого і третього поясів ЗСО;
- карта гідроізогіпс підземного горизонту;
- план першого поясу ЗСО в масштабі 1:500 - 1:1000;
- план другого і третього поясів ЗСО в масштабі 1:10000 - 1:25000 .

Крім того, для підземних джерел необхідно забезпечувати суворе виконання санітарно-гігієнічних вимог щодо конструкцій свердловин та їх облаштування.

Зона санітарної охорони поверхневого джерела являє собою територію, яка охоплює водоймище для використання і частково басейн його живлення. На цій території установлюється режим, який гарантує надійний захист джерела від забруднення та забезпечує необхідні санітарні якості води. Така зона санітарної охорони складається із трьох поясів. У межі першого поясу ЗСО інфільтраційної водозабірної споруди потрібно включати територію між водозабірною спорудою і поверхневим джерелом водопостачання, якщо відстань між ними менше ніж 150 м. Для водозабірних спорудах ковшового типу в межі першого поясу включається вся акваторія ковша та територія навколо нього смугою не менше ніж 100 м.

Топографо-геодезичний матеріал включає:

- ситуаційний план із джерелом мінеральних вод (басейни його живлення) в масштабі 1:50000-1:100000; межі другого і третього поясів ЗСО;
- гідрологічні профілі по характерних напрямках у межах області живлення поверхневого водозабору;
- план першого поясу ЗСО в масштабі 1:500-1:1000;
- план другого і третього поясів ЗСО в масштабі 1:25000 - 1:50000 з нанесенням всіх розташованих на даній території об'єктів.

У першому поясі підземних і поверхневих джерел заборонені [4]:

- всі види будівництва, які безпосередньо не пов'язані з експлуатацією, реконструкцією водопровідних споруд та мереж;
- розміщення житлових і громадських будівель;
- випуск стічних вод;

- випас худоби;
- застосування пестицидів, органічних і мінеральних добрив;
- проведення головної рубки лісу;
- інші види водокористування, що впливають на якість води.

Аналіз проведених досліджень вказує, що до цих пір не визначена топографо-геодезична точність точність винесення в натуру ЗСО в залежності від гідрологічних умов місцевості, ґрунтового та рослинного покриву, рельєфу тощо. Все це потребує додаткових досліджень та сприятиме підвищенню оцінки якості мінерально-сировинного ресурсу, що може значно підвищити інвестиційну та туристичну привабливість окремих територій.

References

1. Water Code of Ukraine dated 06.06.1995 No. 213/95-VR // Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine. – 1995. – No. 24. – Art. 189.
2. Water supply. External networks and structures. Basic design provisions: DBN V.2.5-74:2013. — [Effective from 2014-01-01]. — К.: SE "Ukrakbudoinform", Ministry of Regional Development of Ukraine, 2013. — 172 p.
3. On the approval of the Procedure for determining the size and boundaries of water protection zones and the regime of economic activity in them: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 05/08/1996 No. 486 — [Electronic resource] / Access mode: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/486-96-%D0%BF>
4. On the legal regime of zones of sanitary protection of water bodies: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 18.12.1998 No. 2024 — [Electronic resource] / Access mode: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2024-98-%D0%BF>
5. Syviy Myroslav Geography of mineral resources of Ukraine: monograph / Myroslav Syviy, Ihor Paranko, Yevhen Ivanov. — Lviv: Prostir M, 2013. — 684 p.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.32

Lev Perovych

TOPOGRAPHICAL AND GEODETIC PROVISION OF SANITARY ZONES OF MINERAL WATER SOURCES

Topographic and geodetic support for the formation of zones of sanitary protection of mineral water sources is an important component of the land management project in the field of treatment and rehabilitation of the population. In this regard, the variety of hydro-mineral potential of Ukraine, its operational reserves and the current state of use are briefly presented. An important component of ensuring the high-quality state of water in mineral springs is the topographic-geodetic establishment of the boundaries of water protection zones based on hydrogeological, topographic and other factors that shape the quality structure of the water environment. The theses structured the topographic-geodetic provision of sanitary protection zones depending on the type of mineral water sources (underground, surface). It has been established that the practical determination of the accuracy of establishing the boundaries of water source protection zones requires additional theoretical research.

Key words: mineral water, underground water sources, surface water sources, sanitary protection zones, topographical and geodetic materials

Відомості про автора / Information about the Author

Лев Перович, д. техн. наук, професор, завідувач кафедри управління земельними ресурсами факультету економічних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: levperovych@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0238-7072>.

Lev Perovych, Doctor of Technology of Sciences, professor, head of the Department of Land Resources Management, Faculty of Economic Sciences, Black Sea National University named Petro Mohyla, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: (hidden) orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0238-7072>.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.33

Анастасія Руда

АНАЛІЗ МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ТА МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЗЕМЕЛЬ ПРИМОРСЬКИХ РЕГІОНІВ

Метою цього дослідження є аналіз підходів до оцінки морських та прибережних територій. У роботі охарактеризовано такі інструменти визначення вартості, як моделі гедоністичного ціноутворення та аналітичний багатокритеріальний метод оцінки, який поєднує метод аналізу ієрархій та модель дисконтованих грошових потоків. Оцінювання акваторій та прибережних ділянок також базується на фундаментальній концепції загальної економічної цінності та концепції загальної вартості активів, які дозволяють поєднати дохідний, витратний та девелоперський підходи.

В результаті дослідження обґрунтовано необхідність створення морського кадастру в Україні, що містить економічну інформацію. Це дасть можливість усім суб'єктам управління отримати доступ до даних про природний капітал, зменшуючи при цьому ймовірність управлінських помилок і забезпечуючи сталий розвиток приморських регіонів.

Ключові слова: морське просторове планування, морський кадастр, методи оцінки морських та прибережних територій, екосистемні послуги

Морські території розглядаються Європейською комісією як важливі фактори розвитку економіки Європи, що мають значний потенціал до зростання, інновацій та підтримки цілей сталого розвитку, передбачених стратегією «Блакитного зростання» Європейського союзу [1]. В межах цих територій активно переплітаються інтереси різних сфер господарювання таких як портова інфраструктура, торгове судноплавство, видобувна промисловість, марікультура, рекреаційно-туристична діяльність, тощо. Інтенсивне навантаження на обмежені морські ресурси та прибережні зони є причиною виникнення просторових та функціональних конфліктів, що зумовлює необхідність впровадження механізмів держаного управління та просторової організації морських територій. Серед таких механізмів важливу роль відіграє морське просторове планування та морський кадастр.

Зокрема, Рамкова директива Європейського Союзу 2014/89/EU встановлює вимогу щодо впровадження морського просторового планування серед країн учасниць, які мають вихід до моря. Це дає можливість визначити, які ділянки морського простору є придатними для різних видів діяльності, що, в свою чергу, дає змогу зменшити конфлікти та забезпечити досягнення екологічних, економічних та соціальних цілей [1].

Ефективне управління морським простором має забезпечуватись надійною інформаційною та правовою основою. Таку основу забезпечує морський кадастр, який є цифровою геоінформаційною системою, що визначає межі, права власності, користування та чинні обмеження щодо морських територій. Основною особливістю акваторій, порівняно із суходолом, є відсутність видимих фізичних меж, що потребує застосування точних методів для їх юридичного встановлення. У цьому контексті впровадження морського кадастру забезпечує геопросторове розмежування морських та прибережних зон.

Таким чином, морське просторове планування та морський кадастр взаємопов'язані та посилюють один одного, оскільки кадастр забезпечує актуальними даними щодо меж, розташування та прав власності, тоді як планування визначає шляхи оптимального використання цих ресурсів. Формування та впровадження цих систем стає необхідним етапом для приморських держав, що прагнуть відповідати міжнародним стандартам екологічного та економічного розвитку та європейським нормативно-правовим документам управління морськими та прибережними зонами.

Важливим аспектами у наукових дискусіях пов'язаних з питанням створення морського кадастру мають бути: визначення спільних рис, які поєднують морський кадастр з наземними аналогами, а також визначення вартості морських акваторій та прибережних територій [2].

Слід також зазначити, що зростання чисельності населення прибережних зон у більшості країн перевищує аналогічні показники для територій, віддалених від узбережжя. Це передусім зумовлено низкою історичних, економічних та географічних чинників, які підвищують привабливість прибережних регіонів для проживання та сприяють інтенсивній міграції. Як наслідок, саме тут сконцентрована значна частина світових мегаполісів [3].

В умовах високої щільності населення та високої інтеграції наземних та водних бізнес-процесів особливі актуальності набуває об'єктивне визначення вартості акваторій та прибережних ділянок. Цей аспект має значущу роль для девелопменту, розбудови рекреаційної інфраструктури та забезпеченні сталого природокористування.

Для приморських регіонів взаємодія між сушею і морем формує унікальні умови, що потребують більш комплексного та і спеціалізованого підходу до оцінки.

Такі тенденції на сьогодні для України мають кризовий характер. Повномасштабна війна спричинила обмеження доступу до морських акваторій через окупацію частини територій, мінування узбережжя, блокування судноплавства та суттєві руйнування портової інфраструктури і курортних зон. Стандартні ринкові механізми не спроможні оцінити воєнні ризики та екологічні збитки.

Планування повоєнного відновлення для приморських областей потребує нових підходів до системи управління ресурсами. Реконструкція міст, відновлення туристичного сектору та модернізація морських портів значною мірою залежатиме від залучення інвестицій. Для залучення інвесторів необхідно створити прозору, структуровану та зрозумілу систему оцінки вартості активів та ресурсів. Створення та функціонування морського кадастру з інтеграцією відповідних даних стане важливою передумовою для ефективного поєднання економічних інтересів бізнесу з вимогами екологічної безпеки, а також чітким визначенням прав обмежень та обов'язків щодо морських та прибережних ділянок.

Метою цього дослідження є аналіз та порівняльна характеристика існуючих методичних підходів до оцінки земель приморських регіонів для розробки пропозицій щодо інтеграції даних про вартісну оцінку показників морських та прибережних територій при створенні морського кадастру в Україні.

Для визначення вартості нерухомості Міжнародна рада зі стандартів оцінки (IVSC) та інші провідні інституції, що розробляють стандарти оцінки виділяють три базові підходи: ринковий, витратний та дохідний. В свою чергу, дохідний підхід передбачає використання специфічних методів: інвестиційного, залишків, дисконтованих грошових потоків та прибутку. Водночас, зростає визнання сучасних методів оцінки, серед яких: штучні нейронні мережі (ANNs), гедоністичне ціноутворення, просторовий аналіз, нечітка логіка, моделі ARIMA та багатокритеріальні методи прийняття рішень [3].

З метою оцінювання вартості прибережної землі та об'єктів нерухомості, розташованих на ній у сучасній практиці переважно використовуються моделі гедоністичного ціноутворення [3].

Основою гедоністичного ціноутворення є припущення, що споживачі оцінюють окремі характеристики товару, а не сам товар як окрему цілісну одиницю. Ринкова ціна, при цьому, відображає неявні (латентні) граничні вартості кожного окремого атрибута. Завдяки побудові функції ціни на ринках диференційованих товарів можна визначити показник граничної готовності платити - MWTP [4].

Цей підхід передбачає два етапи, які мають бути чітко розмежовані. Перший етап має емпіричний характер, другий орієнтований на виявлення переваг. На другому етапі потрібно дотримуватись жорстких припущень для визначення вподобань та механізмів формування характеристик товару, що також потребує врахування неспостережуваних атрибутів та неоднорідності споживчих смаків [4].

Суттєвою емпіричною проблемою гедоністичного ціноутворення є вибір математичної специфікації. Для проведення розрахунків можуть застосовуватись різні функціональні форми, зокрема лінійна, напівлогарифмічна чи подвійна логарифмічна. Недостатньо обґрунтований вибір цієї форми спричинює значні похибки та суперечливі результати при оцінюванні вартості нерухомості [3].

Також, визначення граничної готовності платити може ускладнюватись через просторово-часовою динаміку ринку та взаємозалежність внутрішніх факторів. З метою зменшення ризику виникнення похибок в даному випадку слід застосовувати спеціальні моделі ідентифікації [4].

Загалом, при правильному виборі умов ідентифікації та математичної специфікації, гедоністична модель слугує міцною теоретичною базою для визначення вартості об'єктів нерухомості, в тому числі і приморських земель.

Гедоністичний метод може бути застосований, для прикладу, з метою врахування цінності пляжу, особливо його ширини, у структурі ринкових цін на прибережну нерухомість [5], або для побудови регресійної моделі, що дозволяє кількісно та якісно оцінити вплив прибережної ерозії на ринкову вартість прибережних територій [3], чи для визначення взаємозв'язку між якістю морської води та вартістю житлової нерухомості прибережного міста, яке стрімко урбанізується [6].

Для оцінки ландшафту у межах стоянки для маломірних суден (марин) застосовують аналітичний багатокритеріальний метод оцінки (AMUVAN), який полягає у опосередкованому оцінюванні ландшафту шляхом застосування методу аналізу ієрархій для визначення відносної значущості окремих компонентів вартості, які на наступному етапі інтегруються у модель дисконтованих грошових потоків [7].

Метод аналізу ієрархій, розроблений Т. Сааті, є ефективним інструментом для вирішення складних задач багатокритеріального вибору, особливо якщо необхідно врахувати нематеріальні параметри. В його основі є аналітична обробка експертних оцінок в результаті якої можна визначити пріоритетність варіантів рішень шляхом попарного порівняння критеріїв з подальшим складанням нормалізованої матриці. Далі, розраховується вектор пріоритету, що дає змогу встановити нормовані вагові коефіцієнти для кожного з розглянутих варіантів. З метою перевірки узгодженості критеріїв розраховується значення коефіцієнту узгодженості, який відображає якість експертних суджень [7;8].

З метою приведення майбутніх фінансових показників до їхньої теперішньої вартості використовують ставку дисконтування, що відображає ступінь переваги, яку суспільство надає споживанню товарів та послуг у теперішньому часі порівняно з майбутнім. Нульове значення цієї ставки свідчить, що для людей поточне і

майбутнє споживання рівнозначні. Позитивне значення ставки дисконтування підтверджує, що поточні потреби є важливіші за майбутні, за таких умов відтермінувати споживання стає суттєво складнішим. Вибір оптимальної ставки дисконтування відіграє вирішальну роль у процесі оцінювання проєктів, проте відсутня згода щодо того, яким чином її слід розраховувати та встановлювати. Основний виклик зводиться до того, що порядок визначення цієї ставки ґрунтується на різних морально-етичних поглядах розподілу ресурсів між теперішніми та майбутніми поколіннями. Через це в науковій літературі зафіксовані різні показники ставок, які застосовуються в різних країнах. Загалом, існують три основні підходи до визначення ставки дисконтування. Перший підхід базується на постійній ставці суспільного превалювання, яка відображає готовність людей відкласти поточні потреби заради більших вигід у майбутньому та врахувати інтереси майбутніх поколінь. Другий підхід зосереджується на соціальній вартості втрачених можливостей та реальній прибутковості капіталу у порівнянні з найбільш перспективним альтернативним проєктом. Третій підхід поєднує у собі попередні підходи. На практиці ставку дисконтування обирають за сталонними значеннями, наведеними у посібниках [7].

На завершальному етапі усі розраховані складові, враховуючи цінність майбутніх альтернатив, додаються. Це підсумкове значення є фінальним результатом методу AMUVAN, відображаючи комплексну вартість досліджуваного об'єкта.

Застосування ринкового (порівняльного) підходу до оцінки морських територій ускладнюється їхньою специфікою. Водний простір, на відміну від земельних ділянок, не виступає об'єктом ринкових угод у сфері нерухомості. Застосування порівняльного підходу є доцільним переважно для прибережних зон, які мають тісний зв'язок із нерухомістю, розташованою на суші і для якої є достатній обсяг даних про ринкові угоди. У випадку, коли об'єктом оцінки є морський простір недостатність інформації, або повна її відсутність унеможливило використання даного методу [2].

Оцінювання морських та прибережних територій може здійснюватися шляхом поєднання дохідного, витратного та девелоперського підходів. Така методологія забезпечує комплексний територіальний аналіз та полягає у застосуванні методу фінансової оцінки конкретного водного наділу, який через інструменти капітального бюджетування дозволяє визначити ключові показники: чиста теперішня вартість, внутрішня норма рентабельності, співвідношення вигід і витрат. Розрахунок здійснюється на основі понесених інвестицій, прогнозованих доходів і поточної вартості ресурсів. Якщо об'єктом аналізу є масштабна прибережно-морська територія, зазначені фінансові формули дисконтування інтегруються з екологічною концепцією загальної економічної цінності (TEV), що дозволяє врахувати прямі та непрямі вартості використання та вартості невикористання (майбутній потенціал прямих і непрямих ресурсів; вартість, пов'язана з їх захистом та збереженням). У випадку проведення оцінки мілководних територій та необхідності врахування землі, як складової прямого використання, метод і сама вартість називаються «загальна вартість активів» (TAV), та враховує соціально-екологічні, економічні та земельні фактори [2].

У рамках концепції загальної економічної цінності (TEV) здійснюється оцінка екосистемних послуг, як сукупності прямих а непрямих вигід, що забезпечується природним капіталом для підтримання життєдіяльності та добробуту людства. Зазначений підхід дозволяє кількісно оцінити потоки благ, що забезпечує їх інтеграцію у державну політику та стратегічне планування, забезпечуючи належне врахування ролі природних систем у процесах прийняття рішень [9].

Прибережні морські екосистеми забезпечують продукцією ринкових товарів (продовольство, сировина, відновлювальна енергія) та значним обсягом неринкових послуг (стабілізація берегової лінії, колообіг поживних речовин, стабілізація берегової лінії, туризм, рекреація, та ін.). Визначення вартості екосистемних послуг створює передумови для обґрунтованого управління природними ресурсами, а також надає можливість розрахувати витрати на пом'якшення наслідків кліматичних катастроф та формуванню параметрів страхової політики. Крім того, це допомагає забезпечити раціональний розподіл ресурсів і врегулювання конфліктів між економічним освоєнням відновлювальної енергетики та збереженням берегових систем [9].

Отже, морські та прибережні території мають вагомe значення в економічному розвитку приморських регіонів та одночасно уособлюють в собі вразливі екосистеми. Традиційний підхід до оцінки територій, що орієнтований здебільшого на аналізі фізичних параметрів ділянки та ринкових операцій з аналогічними об'єктами, стає недостатнім в умовах кліматичних змін та суттєвого антропогенного навантаження. Для ефективного управління такими територіями необхідно перейти до комплексного оцінювання прибережно-морського простору, де цінність прибережних та морських територій має поєднувати оціночні параметри моря та суходолу і враховувати просторові, екологічні та економічні показники в межах морського кадастру.

Головним механізмом, який дозволяє збалансувати інтереси довкілля, держави, громади та підприємств в приморських регіонах є морське просторове планування. Водночас надійною основою такого планування має стати морський кадастр. Його впровадження в Україні забезпечить сферу геодезії та управління земельними ресурсами потужною геоінформаційною платформою, яка містить просторові, правові, еколого-економічні дані.

Поєднання інформації про вартісну оцінку акваторій та прибережних територій з геопросторовими можливостями морського кадастру надасть можливість прийняття зважених управлінських рішень, розрахунку екологічних збитків та забезпечить сталий розвиток місцевих громад.

References

1. Schernewski G, Inácio M and Nazemtseva Y (2018) Expert Based Ecosystem Service Assessment in Coastal and Marine Planning and Management: A Baltic Lagoon Case Study. *Front. Environ. Sci.* 6:19. doi: 10.3389/fenvs.2018.00019
2. Johanes P. Tamtomo. (2006). A Method to Assess the Financial Value of the Sea Parcel and the Economy of the Coastal and Marine Area within a Marine Cadastre Framework. U Shaping the Change XXIII FIG Congress (s. 1–14). https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2006/papers/ts11/ts11_01_tamtomo_0257.pdf
3. Abdul Hamid, H., Darwin, N., Mohsen, M., Md. Yunus, N., Ismail, A., Mohd Ariff, M. F., & Majid, Z. (2023). A COASTAL EROSION DERIVATION FORMULA FOR VALUING THE COASTAL LAND VALUES IN MALAYSIA. *PLANNING MALAYSIA*, 21(27). <https://doi.org/10.21837/pm.v21i27.1292>
4. Karanikolas, N., Kyriakidou, E., & Athanasouli, E. (2025). Artificial Intelligence and Real Estate Valuation: The Design and Implementation of a Multimodal Model. *Information*, 16(12), 1049. <https://doi.org/10.3390/info16121049>
5. Landry, Craig E., Dylan Turner, Tom Allen. (2022). Hedonic property prices and coastal beach width. *Applied Economic Perspectives and Policy* 44(3): 1373–1392. <https://doi.org/10.1002/aep.13197>
6. Yao, Z., & Cao, X. (2025). Valuing Clean Coasts: Hedonic Evidence of Ocean Water Quality Effects on Housing Prices in Shenzhen, China. *China* (May 01, 2025). URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5275015
7. Martín, R., & Yepes, V. (2022). Economic Valuation of Landscape in Marinas: Application to a Marina in Spanish Southern Mediterranean Coast (Granada, Spain). *Land*, 11(9), 1400. <https://doi.org/10.3390/land11091400>
8. Sai, V., Perovych, I., Gubar, Y., Khavar, Y., Lazariyeva, O., Ruda, A. and Gumennyi, M. (2025). Methodology for Assessing the Environmental Impact of Wind Energy Facilities. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 8(1): 494–516. Doi: <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080120>
9. Wan Ab Rashid, W. N. A., & Mohamad, J. (2025). REVIEW VALUATION METHOD FOR MARINE ECOSYSTEM SERVICE. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 16(2), 181–195. <https://doi.org/10.33736/jcest.8977.2025>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.33

Anastasiia Ruda

ANALYSIS OF METHODOLOGICAL APPROACHES AND METHODS FOR LAND VALUATION IN COASTAL REGIONS

The purpose of this study is to analyze approaches to the valuation of marine and coastal areas. The paper describes valuation tools such as hedonic pricing models and an analytical multi-criteria valuation method that combines the analytic hierarchy process with the discounted cash flow model. The valuation of water areas and coastal plots is also based on the fundamental concept of total economic value and the concept of total asset value, which allow for the integration of income, cost, and development approaches.

The study substantiates the need to create a marine cadastre in Ukraine that contains economic information. This will enable all management entities to access data on natural capital, thereby reducing the likelihood of management errors and ensuring the sustainable development of coastal regions.

Keywords: marine spatial planning, marine cadastre, methods for assessing marine and coastal areas, ecosystem services

Відомості про автора / Information about the Author

Анастасія Руда, старший викладач кафедри управління земельними ресурсами, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна, E-mail: anastasiya.tonch@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0004-6460-349X>.

Anastasiia Ruda, Senior Lecturer in the Department of Land Management, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. Email: anastasiya.tonch@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0004-6460-349X>

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.34

Дмитро Стерлес

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ФОРМУВАННЯ ПРОЄКТУ ЗЕМЛЕУСТРОЮ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ РЕКРЕАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В тезах зазначено, що рекреаційна діяльність об'єднує санаторно-курортну, туристичну, культурно-розважальну та фізкультурно-оздоровчу діяльності. Рекреаційна діяльність є комплексом організації території, яка спрямована на отримання рекреаційного ефекту. Зазначено, що причиною їх функціонування є підвищення добробуту населення. Основними етапи формування та розвитку земель рекреаційного призначення є локалізаційний, концентраційний та комплексно-утворюючий. Вказано, що включають в себе роботи із землеустрою щодо встановлення меж земельної ділянки в натурі (на місцевості) та технічна документація. Розглянуто проектне рішення, яке включає характеристику земельної ділянки та заборони щодо користування земельною ділянкою.

Ключові слова: рекреація, проєкт землеустрою, землі рекреаційного призначення, земельна ділянка, документація із землеустрою.

Рекреація визначається як відтворення фізичних, психічних, духовних та інтелектуальних здібностей людини, які можливі в результаті оздоровчої, пізнавальної та культурної діяльності. Рекреація також визначається як вид природокористування, процесу відпочинку чи господарської діяльності [1, С. 27].

Рекреаційна діяльність – це вид діяльності людини, що спрямований на її оздоровлення та задоволення потреб щодо відпочинку у вільний час [2, с. 23].

Відповідно до законодавства, рекреаційна діяльність об'єднує санаторно-курортну, туристичну, культурно-розважальну та фізкультурно-оздоровчу діяльності. А визначає туристичну діяльність “тимчасовий виїзд людини з місця постійного проживання в оздоровчих, пізнавальних, професійно-ділових чи інших цілях без здійснення оплачуваної діяльності в місці перебування” [3]. Тобто, рекреаційна діяльність охоплює не лише матеріальну сферу життя та розвитку людини, а й нематеріальну, що формується за допомогою багатьох компонентів, без існування хоча б одного з яких не відповідає своєму визначенню.

Рекреаційна господарська діяльність є складовою соціальної сфери та взаємодіє з її компонентами: продовольчий комплекс, виробництво товарів широкого вжитку, побутова та культурна галузі, які являються учасниками рекреаційної діяльності.

Зважаючи на це, рекреаційну діяльність можна вважати комплексом організації територій, яка спрямована на отримання рекреаційного ефекту. Однак, комплексом не можна вважати, а тим паче, під цим поняттям не можна об'єднувати всі землі рекреаційного призначення України. Адже, адміністративні одиниці в складі рекреаційного господарства належать до різних галузей чи сфер і мають різну організаційну підпорядкованість, що визначає його як окремий сектор господарства.

Реалізацією розвитку рекреаційних земель є функціонування державної політики, що забезпечує регулювання та соціально орієнтовану ринкову економіку. Вона спрямована на високотехнологічне екологічне забезпечення землекористування, що можливе завдяки прогнозуванню, плануванню та охорони земель.

Однак, законодавче забезпечення щодо розвитку земель рекреаційного призначення має своє підґрунтя. Основною причиною їх функціонування є підвищення добробуту населення (зниження рівня захворюваності, відновлення та розвиток творчого потенціалу людей, зростання кількості робочих місць, збільшення надходжень коштів до бюджету від рекреантів). А можливість користування рекреаційними послугами не залежить від рівня матеріального добробуту населення, адже різні верстви населення мають попит на відмінні послуги рекреаційного характеру: при високому рівні добробуту населення існує попит на підвищення якості та створення

нових видів рекреаційних послуги, а низький рівень добробуту демонструє користування наявними та доступними ресурсами.

Стадіями формування рекреаційних комплексів загалом та земель рекреаційного призначення зокрема є: початкова; розвитку; спеціалізації; комплексна; реконструктивна.

Існують наступні етапи формування та розвитку земель рекреаційного призначення:

1. Локалізаційний, за яким наявне поодинокі розміщення об'єктів рекреаційного призначення;
2. Концентраційний, що характеризується зростанням чисельності рекреантів та кількості рекреаційних закладів і об'єктів, збільшенням числа супутніх підприємств та формуванням рекреаційної спеціалізації;
3. Комплексно-утворюючий, який включає виділення рекреації в провідну функцію зайнятості населення, в той час як всі інші галузі виступають допоміжними та супутніми.

Земельна ділянка, що передана в оренду для будівництва та обслуговування об'єктів рекреаційного призначення, входить до складу земель рекреаційного призначення, придатних для розміщення стаціонарних об'єктів (землі в межах та за межами населених пунктів, на яких розміщуються соціально-культурні, туристичні, туристично-оздоровчі, інші заклади та об'єкти рекреаційного призначення).

Залежно від місця розташування, вона є складовою земель, на яких розташовані зони відпочинку населення, об'єкти туризму для проведення спортивних та культурно-розважальних заходів у межах населених пунктів;

Діяльність об'єкта передбачає спеціальне використання земель, що здійснюється за плату, яка встановлюється відповідно до Податкового кодексу України.

У разі псування, забруднення, пошкодження, виснаження та інших факторів, які впливають на погіршення екологічного стану на землях рекреаційного призначення, що зумовлене непридатністю їх до використання за призначенням, у разі виникнення загрози життю та здоров'ю громадян, які ними користуються, органи виконавчої влади або органи місцевого самоврядування можуть обмежити право на використання земель рекреаційного призначення в обсязі, передбаченому законом або договором, шляхом встановлення заборони на:

- 1) передачу в оренду (суборенду), а також зміну цільового призначення земельної ділянки, її ландшафту;
- 2) провадження окремих видів господарської та іншої діяльності, зокрема спорудження будь-яких будівель та інших об'єктів, не пов'язаних з експлуатаційним режимом таких земельних ділянок;
- 3) скидання дренажно-скидних та стічних вод;
- 4) облаштування стоянок автомобілів, пунктів їх обслуговування (ремонт, миття тощо);
- 5) влаштування вигребів (накопичувачів) стічних вод, полігонів рідких і твердих відходів, полів фільтрації та інших споруд;
- 6) влаштування звалищ, гноєсховищ, кладовищ, скотомогильників, а також накопичувачів рідких і твердих відходів виробництва, інших відходів, що призводять до забруднення водойм, ґрунту, ґрунтових вод, повітря;
- 7) здійснення промислової вирубки зелених насаджень, а також будь-яке інше використання земельних ділянок і водойм, що може призвести до погіршення їх природних факторів;
- 8) будівництво підприємств, установ і організацій, діяльність яких може негативно впливати на ландшафтно-кліматичні умови, стан повітря, ґрунту та вод земель рекреаційного призначення.

Також може бути передбачено інші обмеження антропогенного впливу на землі рекреаційного призначення.

Місце розташування земельної ділянки, передбаченої до відведення, показано на вкопйованні з картографічної основи Державного земельного кадастру (публічної кадастрової карти), що показано на рис. 1.



Рис. 1. Вкопйовання з картографічної основи Державного земельного кадастру
Джерело: дані Державного земельного кадастру

Отже, роботи із землеустрою щодо встановлення меж земельної ділянки в натурі (на місцевості) включають:

- збір та аналіз виконавцем наявних документації із землеустрою, матеріалів інвентаризації земель, планово-картографічних матеріалів, правових підстав надання земельної ділянки у власність (користування), відомостей про наявність спірних питань щодо меж земельної ділянки, переліку обмежень у використанні земельної ділянки і наявні земельні сервітути, списків координат пунктів державної геодезичної мережі;

- аналіз вихідних матеріалів, даних Державного земельного кадастру та ін.;
- складання плану польових (топографо-геодезичних) робіт;
- виконання геодезичних зйомок на місцевості для визначення поворотних точок меж земельних ділянок;
- встановлення межових знаків в натурі (на місцевості);
- складання проекту землеустрою;
- оформлення проекту землеустрою;
- погодження проекту в місцевому відділі архітектури;
- погодження проекту землеустрою в Держгеокадастрі;
- реєстрація земельної ділянки в Державному земельному кадастрі;
- затвердження проекту з землеустрою на сесії ОМС;
- державна реєстрація прав власності на нерухоме майно.

Технічна документація із землеустрою щодо встановлення меж земельної ділянки в натурі (на місцевості) включає:

- пояснювальну записку, яка містить опис місця розташування земельної ділянки, відомості про власника (користувача) земельної ділянки, відомості про виконавця (виконавців), реквізити відповідних ліцензій, необхідних для виконання робіт, відомості про власників (користувачів) суміжних земельних ділянок, стислий опис виконаних робіт;

- технічне завдання на встановлення меж земельної ділянки в натурі (на місцевості);
- копію документа, що посвідчує фізичну особу, або копію свідоцтва про державну реєстрацію юридичної особи;

- копію документа, що посвідчує право на земельну ділянку (у разі його наявності);
- матеріали польових топографо-геодезичних робіт;
- план меж земельної ділянки, складений за результатами кадастрової зйомки, на якому відображаються зовнішні межі земельної ділянки із зазначенням власників (користувачів) суміжних земельних ділянок, усі поворотні точки меж земельної ділянки, лінійні проміри між точками по межах земельної ділянки, межі вкраплених земельних ділянок із зазначенням їх власників (користувачів). На бажання замовника замість плану меж земельної ділянки може складатися кадастровий план земельної ділянки;

- перелік обмежень у використанні земельної ділянки і наявні земельні сервітути;
- у разі необхідності документ, що підтверджує повноваження особи діяти від імені власника (користувача) земельної ділянки при встановленні меж земельної ділянки в натурі (на місцевості);

- акт прийомки-передачі межових знаків на зберігання, який включається до документації із землеустрою після виконання робіт із встановлення меж земельної ділянки в натурі (на місцевості) та закріплення їх межовими знаками [4].

Отже, під час висвітлення матеріалу здійснено аналіз механізму формування проекту відведення земельної ділянки в оренду. Розглянуто проектне рішення, характеристики земельної ділянки та заборони щодо користування земельної ділянки. Досліджено виконання топографо-геодезичних робіт, що включають роботи по виконанню геодезичних зйомок на місцевості для визначення поворотних точок меж земельних ділянок та встановленню межових знаків в натурі (на місцевості).

References

1. Gabchak N.F., Tkachuk V.V. Peculiarities of the development of tourism and recreation in the Ukrainian-Polish border region Materials of the XIX International Scientific Internet Conference “Trends and Prospects for the Development of Science and Education in the Conditions of Globalization”. Issue 97. (September 30, 2023) State Higher Educational Institution “Pereyaslav-Khmelnytskyi Pedagogical University”, 2023. P. 24-26.
2. Valinkevich N.V., Tyshchenko S.V., Recreational activities and service. Scientific works of the Interregional Academy of Personnel Management. Economic Sciences. Issue 4 (63), 2021. P. 23-28. URL: <https://journals.maup.com.ua/index.php/economics/article/view/1177/1677> [in Ukrainian].
3. Maslyak P.O. Recreational geography: teaching aid. K.: Znannya, 2008. 343 p. URL: https://library.udpu.edu.ua/library_files/425012.pdf

4. 17 Goals to Transform Our World. Sustainable Development Goals. United Nations. Retrieved from: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/> [in Ukrainian].

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.34

Dmitro Sterlev

**THEORY AND PRACTICE OF FORMING A LAND MANAGEMENT PROJECT FOR THE CONSTRUCTION
AND MAINTENANCE OF RECREATIONAL FACILITIES**

The theses state that recreational activities combine sanatorium-resort, tourist, cultural and entertainment, and physical culture and health activities. Recreational activities are a complex of territorial organization aimed at obtaining a recreational effect. It is noted that the reason for their functioning is to increase the well-being of the population. The main stages of the formation and development of recreational lands are localization, concentration and complex-forming. It is indicated that land management work includes establishing the boundaries of the land plot in nature (on the ground) and technical documentation. The design solution is considered, which includes the characteristics of the land plot and prohibitions on the use of the land plot.

Keywords: recreation, land management project, recreational lands, land plot, land management documentation.

Відомості про автора / Information about the Author

Дмитро Стерлев, старший викладач кафедри управління земельними ресурсами факультету економічних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: dstvn@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9925-4200>

Dmitro Sterlev, Senior lecturer of the Department of Management the Landed Management of Petro Mohyla Black Sea University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: dstvn@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9925-4200>

© Д. Стерлев

Стаття отримана редакцією 27.05.2026.

ПРОБЛЕМА ВІТРОВОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ В КОНТЕКСТІ СУЧАСНИХ ЗМІН КЛІМАТУ

Одним із найпоширеніших емпіричних підходів до оцінки кліматичного потенціалу вітрової ерозії є параметр C у рівнянні вітрової ерозії (WEQ), розробленому Міністерством сільського господарства США, який враховує швидкості вітру та ефективності опадів, відображаючи як ерозійну здатність клімату з позиції деградації ґрунтів під впливом сильних вітрів, так і ефективності опадів як комплексного показника вологості ґрунту, що визначає схильність ґрунту до дефляції. Аналіз трендів, розрахованих за даними метеорологічних станцій Півдня України показує на різнонаправленість як по напрямку (додатному або від'ємному), так і по інтенсивності змін кліматичного показника вітрової ерозії. Оцінювання за методом Тейла – Сена показала, що амплітуда змін нахилу Сена складає 6 – 7 одиниць C за 10 років. Найвище зниження кліматичного потенціалу дефляції за період 1980 – 2024 рр. (-3 до -6 одиниць C на десятиліття) спостерігається в причорноморській та приазовській зоні. Невеликі позитивні значення нахилу Сена (0 до +0,9 одиниць C на десятиліття), які вказують на поступове зростання дефляційного потенціалу клімату спостерігається в континентальних районах Херсонської та Запорізької області. На тлі стабільних значень середньорічної швидкості вітру, така динаміка визначається балансом між темпами зростання середньорічної температури та змінами в річній кількості опадів. Виходячи з чинних прогнозів щодо компонентів коефіцієнта C очікується, що виявлені тенденції в регіоні зберуться принаймні до 40-х – 50-х років XXI століття.

Ключові слова: вітрова ерозія, кліматичний параметр, нахил Сена, опади, зміна клімату.

Вітрова ерозія є одним з основних процесів, що призводить до деградації ґрунтів, особливо у посушливих степових та пустельних регіонах Світу. Цей процес, відомий також як «дефляція ґрунту», є актуальним для степових та сухостепових регіонів України, де він має значний вплив на продуктивність сільськогосподарських угідь. Зараз, коли розораність території досягла свого максимального рівня, майже щороку спостерігається локальне проявлення вітрової ерозії, а кожні 5 – 10 років – регіональні та трансконтинентальні курні бурі («чорні» бурі).

Кліматичні умови відіграють ключову роль у процесах вітрової ерозії. Швидкість вітру, режим опадів, вологість ґрунту та температура спільно визначають як ерозійну силу вітру, так і схильність поверхні ґрунту до дефляції (Shao, 2008). В останні десятиліття зміна клімату дедалі частіше визнається важливим чинником вітрової ерозії. Підвищення температури, збільшення частоти посух та зміна характеру опадів можуть суттєво вплинути на кліматичний потенціал вітрової ерозії.

Одним із найпоширеніших емпіричних підходів до оцінки кліматичного потенціалу вітрової ерозії є параметр C у рівнянні вітрової ерозії (WEQ), розробленому Міністерством сільського господарства США (Lyles, 1983). Кліматичний параметр (C) інтегрує ефекти швидкості вітру та ефективності опадів, відображаючи як ерозійну здатність клімату з позиції деградації ґрунтів під впливом сильних вітрів, так і роль ефективності опадів як комплексного показника вологості ґрунту, що сильно впливає на схильність ґрунту до дефляції (Lyles, 1983). Просторовий розподіл цього показника дозволяє зробити оцінку небезпеки виникнення вітрової ерозії в регіональному масштабі в умовах сучасних кліматичних змін.

Кліматичний фактор вітрової ерозії (C) визначається як:

$$C = 386 \cdot v^3 / (PE)^2, \quad (1)$$

де: v – середньорічна швидкість вітру (м/с); PE – індекс ефективності опадів.

Індекс PE визначався за модифікованою формулою Торнтвейта (Lyles, 1983):

$$PE = 3,16 \cdot \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{P_i}{(1,8 \cdot T_i + 22)} \right]^{\frac{10}{9}}, \quad (2)$$

де: P_i – кількість опадів за i -й місяць; T_i – середньомісячна температура повітря.

Часові тенденції параметра S аналізувалися за допомогою оцінювача Тейла – Сена, непараметричного методу, який широко застосовується в аналізі метеорологічних часових рядів (наприклад, Aditya et al., 2021; Han et al., 2023). Оцінювач Тейла – Сена (Sen, 1968) забезпечує надійну оцінку темпу змін шляхом обчислення медіани всіх парних нахилів (β або нахил Сена) між спостереженнями в часовому ряді:

$$\beta = \text{median} \frac{C_j - C_i}{j - i}, \forall j > i \quad (3)$$

де C_i та C_j – значення кліматичного коефіцієнта вітрової ерозії в моменти часу i та j відповідно.

Цей метод нечутливий до екстремальних значень і не вимагає нормального розподілу даних, що робить його придатним для аналізу кліматичних часових рядів, які характеризуються високою мінливістю.

Результати представлені у перерахунку на період в 10 років. Позитивні значення нахилу Сена (β) вказують на тенденцію до зростання потенціалу кліматичної вітрової ерозії у період 1981 – 2024 рр., тоді як негативні значення відображають тенденцію до зниження.

Для перевірки статистичної значущості трендів використовувався критерій Манна – Кендалла. Був використаний параметр τ Кендела, який показує на напрямок та стабільність тренду та критерій p -value, що визначає рівень значущості. Величина τ змінюється від -1 до +1. Додатні значення τ вказують зростання показника S у часі, від'ємні – на зменшення. Чим ближче значення до 1(-1), тим більш впорядковано (менш «шумно») ряд змінюється у часі. А тренд вважається статистично значущим лише при $p < 0,05$. Менш значущим тренд буде, коли $0,05 < p < 0,10$.

На Півдні України спостерігається певна строкатість і в напрямку (додатному або від'ємному), і в інтенсивності змін кліматичного показника вітрової ерозії. Значення ухилу Сена варіюють у широких межах: від +0,94/10 років (Токмак) до -6,59/10 років (Керч), тобто амплітуда змін складає 6 – 7 одиниць S за 10 років. Що стосується статистичної значущості, то $p < 0,05$ спостерігається лише по одній станції Керч ($p = 0,011$) (табл.).

Таблиця 1

Аналіз трендів показника вітрової ерозії по метеорологічним станціям Півдня України.

№№	Метеорологічна станція	Ухил Сена (за 10 років)	τ Кендела	p-value	№№	Метеорологічна станція	Ухил Сена (за 10 років)	τ Кендела	p-value
1.	Армянськ	-1,77	-0,085	0,418	16.	Миколаїв	-0,24	-0,021	0,840
2.	Джанкой	-1,38	-0,085	0,418	17.	Очаків	-4,03	-0,180	0,086
3.	Євпаторія	-1,34	-0,057	0,585	18.	Первомайськ	-0,25	-0,034	0,746
4.	Керч	-6,59	-0,266	0,011	19.	Ананьєв	0,23	0,023	0,824
5.	Симферопіль	0,14	0,017	0,871	20.	Арциз	-0,78	-0,059	0,571
6.	Чорноморське	0,86	0,053	0,613	21.	Білгород-Дністровський	-2,55	-0,163	0,119
7.	Генічеськ	-2,21	-0,093	0,380	22.	Вілкове	-2,63	-0,131	0,210
8.	Феодосія	-4,21	-0,195	0,063	23.	Ізмаїл	-0,29	-0,070	0,504
9.	Асканія-Нова	0,41	0,025	0,808	24.	Одеса	-3,02	-0,156	0,134
10.	Нижні Сірогози	0,74	0,055	0,599	25.	Бердянськ	-0,49	-0,032	0,762
11.	Нова Каховка	0,75	0,053	0,613	26.	Гуляй Поле	0,78	0,082	0,430
12.	Скадовськ	-3,42	-0,148	0,157	27.	Запоріжжя	-0,11	-0,017	0,871
13.	Херсон	-1,01	-0,063	0,544	28.	Мелітополь	0,77	0,049	0,642
14.	Баштанка	-0,27	-0,030	0,777	29.	Пологи	0,78	0,082	0,430
15.	Вознесеньск	-0,08	-0,013	0,903	30.	Токмак	0,94	0,089	0,396

Менш значущі, коли $0,05 < p < 0,10$ були зміни по Феодосії (0,063) та Очакову (0,086). А по іншим станціям $p >> 0,05$, тобто тренд був статистично незначущий (табл.).

Що стосується просторової мінливості як за величиною, так і за напрямком тенденцій кліматичного дефляційного потенціалу, то у північних районах Одеської та Миколаївської областей, спостерігається незначний

від'ємний нахил Сена. Це вказує на поступове зменшення кліматичного дефляційного потенціалу протягом досліджуваного періоду. Середній темп зниження нахилу Сена коливається від 0 до -1 одиниці С за десятиліття.

Натомість південні регіони, зокрема прибережні райони Одеської, Миколаївської та Запорізької областей, а також більша частина Херсонської області та Криму, тобто території, що повністю розташовані в зоні найбільшої схильності до дефляції в Україні (Чорний, 2024), демонструють найвиразніше зниження кліматичного потенціалу дефляції за період 1980 – 2024 рр. У цих районах нахил Сена досягає значень від -3 до -6 одиниць С на десятиліття. Найнижче значення було зафіксовано на Керченській метеостанції (-6,7 одиниці С на десятиліття) (табл.).

Водночас у кількох районах у центральній та східній частинах Херсонської та Запорізької областей, а також у передгір'ях Криму спостерігаються невеликі позитивні значення нахилу Сена, що вказує на поступове зростання кліматичного дефляційного потенціалу у період 1981–2024 рр. Діапазон позитивних тенденцій коливається від 0 до +0,9 одиниць С на десятиліття. Найвище значення нахилу Сена було зафіксовано на метеостанції Токмак (центральна частина Запорізької області) +0.94 одиниць С (табл.).

На перший погляд, переважно негативна тенденція кліматичного дефляційного потенціалу в степовій зоні України, суперечить загальній картині останніх кліматичних змін. Підвищення середньорічної температури повітря за останні 40 – 50 років добре задокументовано в численних дослідженнях (наприклад, Vyshnevski, 2025; Світлічний, 2025) і, згідно з рівнянням (2) має призвести до зниження індексу ефективності опадів (PE) і, як наслідок, до суттєвого збільшення кліматичного коефіцієнта вітрової ерозії (C). Однак детальний часовий аналіз окремих компонентів рівнянь (1) та (2), заснований на даних метеорологічних станцій, які представляють райони з найвищим ризиком вітрової ерозії (Керч, Феодосія, Скадовськ, Одеса), вказує на більш складнішу реальність. По-перше, протягом усього періоду спостережень (44 роки) чисельник рівняння (1), тобто середньорічна швидкість вітру, практично не змінюються у всіх частинах степової зони України. По-друге, аналіз знаменника у рівнянні (1) показує, що часові зміни індексу ефективності опадів (PE) в часі визначаються балансом між темпами зростання середньорічної температури цього показника та змінами річної кількості опадів.

Сучасні кліматичні зміни у степовій зоні України не обмежуються загальним підвищенням температури повітря, а ще характеризуються помітним збільшенням річних опадів у певних частинах регіону. Про збільшення кількості опадів на тлі підвищення температури в регіоні повідомляється, до речі, і в дослідженнях українських кліматологів (Vyshnevski, 2025; Світлічний, 2025).

Тобто на загал по півдню України при відносно стабільній швидкості вітру зростання температури повітря в якійсь мірі компенсується на більшій частині регіону зростанням кількості опадів, а тому індекс ефективності опадів (PE) суттєво не зменшується, а в деяких випадках навіть зростає. А тому кліматичний фактор вітрової ерозії (C) у більшості випадків поступово зменшується. Особливо це помітно в приморських регіонах. Виключенням є центральні та східні частини Херсонської та Запорізької областей та передгір'я Криму, де зростання кількості опадів повністю не компенсує інтенсивної додатної динаміки температур і кліматичний фактор вітрової ерозії поступово, але не набагато, зростає. Щодо оцінки структури часових рядів кліматичного фактора вітрової ерозії, то τ Кендела змінюється в межах -0,266 – +0,089 (табл.), що демонструє відсутність стійкої одноманітно монотонної тенденції до зростання (або зменшення) значень, тобто всі часові ряди погано впорядковані.

Виходячи з чинних прогнозів кліматологів щодо окремих компонентів коефіцієнта C, які прямо, або побічно використовуються в розрахунках (середньорічна швидкість вітру, середньорічна температура та річна норма опадів) (Хохлов і Єрмоленко, 2015; Лялько та ін., 2019; Vyshnevski, 2025), очікується, що виявлені тенденції на Півдні України збережуться принаймні до 2050 років. Тобто передбачається поступове зниження кліматичного дефляційного потенціалу, причому найвиразніше зниження відбудуватиметься у прибережних регіонах та в Криму (за винятком передгірних територій). Водночас у степових районах Херсонської та Запорізької областей очікується поступове зростання кліматичного коефіцієнта вітрової ерозії.

Висновки. На Півдні України спостерігається повна строкатість і в напрямку (додатному або від'ємному), і в інтенсивності змін кліматичного показника вітрової ерозії. Амплітуда змін нахилу Сена по території регіону складає 6 – 7 одиниць С за 10 років. Найвище зниження кліматичного потенціалу дефляції за період 1980 – 2024 рр. (-3 до -6 одиниць С на десятиліття) спостерігається у прибережній зоні. Невеликі позитивні значення нахилу Сена (до +0,9 одиниць С на десятиліття), які вказують на поступове зростання кліматичного дефляційного потенціалу спостерігається в континентальних районах Херсонської та Запорізької областей. На тлі стабільних значень середньорічної швидкості вітру, така динаміка визначається балансом між темпами зростання середньорічної температури та змінами річної кількості опадів. Виходячи з чинних прогнозів щодо компонентів параметра C очікується, що виявлені тенденції в регіоні збережуться принаймні до 50-х років XXI століття.

References

1. Aditya, F., Gusmayanti, E., & Sudrajat, J. (2021). Rainfall trend analysis using Mann–Kendall and Sen's slope estimator test in West Kalimantan. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 893, 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012006>.
2. Han, J., Gelata, F. T., & Gameda, S. C. (2023). Application of Mann–Kendall test and Sen's slope estimator to assess climate change impacts. Journal of Water and Climate Change, 14(3), 977–988. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.508>.
3. Lyles, L. (1983). Erosive wind energy distributions and climatic factors for the West. Journal of Soil and Water Conservation, 38(2), 106–109.
4. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63 (324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>.
5. Shao, Y. (2008). Physics and modelling of wind erosion. Springer.
6. Vyshnevski, V. I. (2025). Climate change in Ukraine and its consequences. Journal of Landscape Ecology, 18(4). <https://doi.org/10.2478/jlecol-2025-0032>.
7. Лялько, В. І., Єлістратова, Л. О., Апостолов, О. А., & Ходоровський, А. Я. (2019). Зміни вітрових параметрів в Україні в умовах глобальних кліматичних змін. Вісті Національної академії наук України, 10, 57 – 66. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.10.057>.
8. Світличний, О. О. (2025). Сучасні кліматичні зміни в північно-західному регіоні Чорного моря. Вісник Одеського національного університету. Географія та геологія, 30(2), 34 – 48. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.2\(47\).344743](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.2(47).344743).
9. Хохлов, В. М., & Єрмоленко, Н. С. (2015). Майбутні зміни клімату та їхній вплив на режим опадів і температури в Україні. Український гідрометеорологічний журнал, 16, 76–82. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.5>.
10. Чорний, С. Г. (2024). Кліматичний фактор вітрової ерозії ґрунту Степу України: просторовий аналіз. Агрохімія і ґрунтознавство, 97, 25 – 30.

DOI 10.34132/mspc2026.02.14.35

Sergiy Chorny

THE PROBLEM OF WIND EROSION OF SOILS IN THE CONTEXT OF CURRENT CLIMATE CHANGE

One of the most common empirical approaches to assessing the climatic potential for wind erosion is the C parameter in the Wind Erosion Equation (WEQ) developed by the U.S. Department of Agriculture, which accounts for wind speeds and precipitation efficiency, reflecting both the climate's erosive capacity in terms of soil degradation under the influence of strong winds and precipitation efficiency as a comprehensive indicator of soil moisture, which determines the soil's susceptibility to deflation. An analysis of trends calculated using data from meteorological stations in southern Ukraine reveals divergent patterns in both the direction (positive or negative) and the intensity of changes in the wind erosion climate index. An assessment using the Theil–Sen method showed that the amplitude of changes in the Sen slope is 6–7 C units over 10 years. The greatest decrease in the climatic potential for deflation during the period 1980–2024 (–3 to –6 units C per decade) is observed in the Black Sea and Azov Sea regions. Small positive values of the Sen slope (0 to +0.9 °C per decade), indicating a gradual increase in the climate's deflation potential, are observed in the continental regions of the Kherson and Zaporizhzhia regions. Against the backdrop of stable values for the average annual wind speed, this trend is determined by the balance between the rate of increase in the average annual temperature and changes in annual precipitation. Based on current projections for the components of the C coefficient, the identified trends in the region are expected to persist at least until the 2040s–2050s.

Keywords: wind erosion, climatic parameter, Sen's slope, precipitation, climate change.

Відомості про автора / Information about the Author

Сергій Чорний, доктор сільськогосподарських наук, професор, професор кафедри управління земельними ресурсами Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: s.g.chorny@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9764-677X>

Sergiy Chorny, Doctor in Agricultural Sciences, Professor, Professor in the Department of Land Resource Management at Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: s.g.chorny@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9764-677X>

Наукове видання

**МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ КОНФЕРЕНЦІЙ
ЧОРНОМОРСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ**

**MATERIALS OF THE SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE
OF PETRO MOHYLA BLACK SEA NATIONAL UNIVERSITY**

**Матеріали XXIII Міжнародної наукової конференції
«ОЛЬВІЙСЬКИЙ ФОРУМ – 2026: стратегії країн
Причорноморського регіону в геополітичному просторі»**

№ 2 (1), 14 серія, 2026

СЕРІЯ: ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Адреса оргкомітету:

м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10, 54003
Тел.: 8 (0512) 50–03–32, 8 (0512) 76–55–81, 8 (0512) 76–55–99, факс: 50–00–69, 50–03–33,
E-mail: avi@chmnu.edu.ua, rector@chmnu.edu.ua

Редактор: *К. Карпова.*

Комп'ютерна верстка, дизайн: *В. Шевченко.*

Друк: *С. Волинець.*

Фальцювальні-палітурні роботи: *О. Мішалкіна.*

Підп. до друку 01.07.2026.

Формат 60x84¹/₈. Папір офсет.

Гарнітура «Times New Roman». Друк ризограф.

Ум. друк. арк. 17,21. Обл.-вид. арк. 12,16. Зам. № 7276.

Видавець і виготовлювач: ЧНУ ім. Петра Могили.

54003, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10.

Тел.: 8 (0512) 50–03–32, 8 (0512) 76–55–81, e-mail: rector@chmnu.edu.ua.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6124 від 05.04.2018.